

**Résistance  
au feu des structures  
béton-acier-bois**

**Б. Бартелеми Ж. Крюппа**

# **Огнестойкость строительных конструкций**



**Москва  
Стройиздат 1985**

**B. Barthélémy, J. Kruppa**

# **Résistance au feu des structures béton-acier-bois**

**Éditions Eyrolles · Paris**

**Б. Бартелеми, Ж. Крюппа**

# **Огнестойкость строительных конструкций**

**Перевод с французского  
канд. техн. наук М.В. Предтеченского**

**Под редакцией  
д-ра техн. наук В.В. Жукова**

**Москва Стройиздат 1985**

**Бартелеми Б., Крюппа Ж.** Огнестойкость строительных конструкций / Пер. с франц. М. В. Предтеченского; Под ред. В. В. Жукова. — М.: Стройиздат, 1985. — 216 с. — Перевод изд.: *Résistance au feu des structures béton — acier — bois* / B. Barthélémy, J. Kruppa.

На основе анализа результатов научно-исследовательских работ французских специалистов приведена методика расчета огнестойкости различных конструкций: бетонных, железобетонных, стальных, деревянных. Рассмотрены принципы пожарной безопасности, проблемы огнестойкости, основы моделирования сложных ситуаций при пожаре. Многочисленные цифровые и графические данные, иллюстрирующие методику расчета, подтверждают возможность определять огнестойкость различных конструкций расчетным путем.

Для научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских и проектных организаций.

Табл. 64, ил. 209, список лит.: 104 назв.

Рекомендовано к изданию Главным управлением пожарной охраны Министерства внутренних дел СССР.

## ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

В последние 20 лет в различных странах проведено большое число экспериментальных и теоретических исследований, посвященных огнестойкости строительных конструкций и свойствам строительных материалов при пожаре. Большую работу в этом направлении выполнили международные организации ISO<sup>1</sup>, RILEM<sup>2</sup>, CIB<sup>3</sup>, FIP<sup>4</sup>. В результате к настоящему времени издан ряд международных и отечественных нормативных документов по методам огневых испытаний и расчету пределов огнестойкости строительных конструкций. Разработаны методы расчета пределов огнестойкости конструкций с применением вычислительной техники для решения нелинейных задач теплопроводности и строительной механики. При этом в ряде случаев используются методы расчета, учитывающие вероятность возникновения пожара, и статистические данные о свойствах материалов. Все это позволяет говорить о появлении новой области строительной науки — огнестойкости строительных конструкций, которая получила развитие в результате использования и объединения в одном направлении специальных знаний по теплофизике, строительной механике и технологии строительных материалов. Эта область продолжает интенсивно развиваться. В настоящее время известно большое число очень интересных работ по огнестойкости строительных конструкций. Но, к сожалению, все эти работы требуют применения достаточно сложных расчетных программ, освоенных, как правило, только пока в НИИ.

В нашей стране также получили развитие машинные методы расчета огнестойкости строительных конструкций и начинают находить применение более простые методы, которые предназначены для инженера проектной строительной организации. При этом не теряется физический смысл рассматриваемой задачи, что особенно важно для задач, связанных с огнестойкостью. Имеется также возможность быстро и квалифицированно с точки зрения пожарной безопасности оценить конструкцию и внести в нее необходимые изменения уже на стадии создания. Последнее является основной целью расчета предела огнестойкости и сравнения его с требованиями норм.

В связи с активным применением в нашей стране расчетных методов определения пределов огнестойкости конструкций, которые должны частично заменить экспериментальные методы огневых испытаний, книга Б. Бартелеми и Ж. Крюппа представляет большой интерес для отечественных специалистов в области пожарной безопасности в строительстве.

По нашему мнению, авторы книги квалифицированно, с большим знанием рассматриваемого вопроса разработали и привели методы расчета пределов огнестойкости по несущей способности (устойчивости) строительных конструкций из железобетона, стали, дерева. Причем они сделали довольно успешную попытку

---

<sup>1</sup> Международная организация по стандартизации.

<sup>2</sup> Международный союз лабораторий по испытанию и исследованию строительных материалов и конструкций.

<sup>3</sup> Международный совет по научным исследованиям и обмену опытом в области строительства.

<sup>4</sup> Международная федерация по предварительно напряженному железобетону.

рассмотреть данный вопрос, начиная с расчета температур в помещении во время пожара; далее они привели обзор данных по свойствам бетона, стали и дерева при пожаре, включая изменение их структуры, теплофизических и физико-механических свойств. В то же время некоторые из приведенных данных по растрескиванию бетона при пожаре, например автора Т. Гармаши (Канада), не всегда использованы достаточно критически. В расчетной части книги рассматривается большое число оригинальных методов расчета, неизвестных по другим источникам. Необходимо отметить оригинальное использование метода предельного равновесия для расчета пределов огнестойкости статически неопределимых конструкций, интересные методы проверки возможности поворота в сечениях, разницы удлинений арматуры и бетона при нагреве и т.д. Авторы книги, к сожалению, не отметили, что метод предельного равновесия, которым они очень широко пользуются, был предложен в СССР д-ром техн. наук А. А. Гвоздевым и получил дальнейшее развитие в работах д-ра техн. наук С. М. Крылова.

Большой интерес для читателей представляют данные по расчету пределов огнестойкости комплексных конструкций. Очень важно, что этот метод показывает, как можно рассчитать предел огнестойкости практически любой строительной конструкции, используя ряд допущений и имеющиеся знания теплофизики и строительной механики. Естественно, в некоторых случаях необходимы дополнительные экспериментальные проверки, о чем упоминают и сами авторы.

Книга принесет большую пользу не только инженерам, проектирующим новые здания и сооружения, но также работникам органов пожарного контроля и специалистам НИИ в области строительства и пожарной профилактики в строительстве.

Для удобства пользования материалом в конце книги дана таблица перевода некоторых единиц в СИ.

*В. В. ЖУКОВ, д-р техн. наук*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

На протяжении двадцати лет я выступаю за развитие логического научного подхода к проблемам проектирования зданий. И теперь мне доставляет большое удовольствие видеть серьезный вклад в такой подход, а именно, ответ на требования пожарной безопасности, что представляет собой определенный переворот в исследуемой области. Этот переворот заключается не только в накоплении новых знаний, которое продолжает оставаться медленным и трудным процессом вследствие большого числа параметров, характеризующих каждый отдельный случай пожара, а главным образом в том, что мы используем весь нынешний объем базовых знаний в области теплофизики и аэродинамики, который сам по себе весьма значителен для прогноза поведения здания при пожаре. Это приводит к разработке простых или значительно более сложных математических моделей, описывающих различные стадии развития пожара и, в частности, стадию, предшествующую полному воспламенению, и следующую за ней, а также распространение газов и дыма по всему объему здания и огнестойкость конструкций.

Такое моделирование является мощным инструментом научного исследования, так как оно указывает характеристики материалов, которые нужно подобрать и заложить в модель, и путем сравнения получаемых результатов с действительными данными позволяет выявить те или иные неясности в самом ходе процесса. Таким образом, моделирование представляет собой гипотезу, необходимую для любого научного исследования.

Кроме того, моделирование в большей степени является средством прогноза сложных явлений на основе более простых измерений без обязательного выхода на уровень физических свойств материалов, чем непосредственное наблюдение реального явления в натуральную величину.

Считают, что такой прогноз часто носит случайный характер. Однако такая постановка вопроса является неточной. Случайными являются лишь исходные данные — величина пожарной нагрузки, наличие открытых окон в здании, наличие ветра и пр.

Наконец, случайным фактором является надежность защитных средств — авторы подчеркивают опасность растрескивания бетона, закрывающего арматуру железобетонных конструкций. Следует отметить также необходимость изучения других систем защиты металла при действии огня и причин повреждений и отказов — смещения панелей, замены набухших защитных слоев обычной краской и пр. Следует стремиться к тому, чтобы защита арматуры железобетона, как и стальных элементов конструкций, представляла собой непроницаемую для огня оболочку, т.е. противопожарную преграду, причем надежность такого непроницаемого для огня покрытия нужно обеспечивать со всей тщательностью.

Будучи следствием случайного характера исходных данных, кривые изменения температуры в зависимости от времени при пожаре в небольшой комнате, в помещении значительного объема или во всем здании крайне разнообразны. Поэтому возникла необходимость в принятии какой-либо условной (стандартной) кривой, хотя бы только для экспериментальных исследований, и ее использовании в лабораториях, которые в настоящее время достаточно оснащены. Важно лишь помнить, что она является условной и характеризует только повышение температуры в помещении, где происходит пожар.

В этих условиях при наличии исходных данных дальнейшая последовательность явлений становится вполне определенной. При этом модели будут служить для прогноза последствий случайного разнообразия исходных данных, а также для разработки на этой основе методов оценки последствий различных случаев пожара.

Кто, исходя из этой оценки, может решить, где установить предел безопасности? Видимо, по этому вопросу можно не согласиться с точкой зрения авторов этой книги. При нынешнем уровне знаний и, по-видимому, еще на долгие годы вперед такая ответственность может быть возложена только на лиц, утверждающих нормативные документы. Без ссылки на нормы никто не может и не хочет нести ответственность за последствия неточной оценки опасности, создаваемой людьми. Нужно совершенствовать нормы в смысле их ясности, чтобы свести до минимума непрекращающиеся дискуссии с органами технического нормирования, принимающие характер своеобразного технического «торга», который строители критикуют и которого одновременно они упорно добиваются. С этой целью нормы должны быть современными по духу и базироваться на научных данных. С этой точки зрения мы находимся вне критики, поскольку Франция является первой из крупных стран мира, где расчет наравне с испытаниями признан доказательством достаточной огнестойкости. Именно изложение научных основ, на которых базируются расчеты, составляет основное содержание книги Б. Бартелеми и Ж. Крюппа.

После изложения основных особенностей пожара, основных сопутствующих ему явлений, их взаимовлияния, вопросов моделирования более сложных явлений авторы указывают пути прогноза поведения железобетонных, стальных, сталежелезобетонных и деревянных конструкций и приводят многочисленные формулы и графики, необходимые для оценки их огнестойкости.

Таким образом, настоящая книга дает инженеру-строителю информацию, необходимую для понимания того, что служит основанием для нормирования расчета огнестойкости, включенного в Единую техническую документацию (DTU), а также является исходными данными, обеспечивающими возможность прогноза огнестойкости конструкций в каждом отдельном случае на основе действительных данных.

Следует поблагодарить авторов за то, что они впервые дали французскому читателю не только основы расчета строительных конструкций на огнестойкость, но и более общую базу для прогноза развития пожара расчетными методами.

ЖЕРАР БЛАШЕР<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Бывший директор Научно-технического центра по строительству (CSTB) в Париже, бывший президент Международного совета по научным исследованиям и обмену опытом в области строительства (CIB). (Примеч. пер.)

## ОТ АВТОРОВ

Эта книга является результатом синтеза многочисленных французских и зарубежных работ в области пожарной безопасности. Нами проанализировано более 200 книг, статей, докладов и других сообщений, и да простят нас их авторы за то, что мы не можем поблагодарить каждого из них в отдельности.

Однако значительная часть исследований, отраженных в настоящей книге, выполнена в Промышленно-техническом центре металлических конструкций (СТИСМ), где благодаря наличию испытательной станции за последние 15 лет, достигнут существенный прогресс в рассматриваемой области, причем не только применительно к специфическим вопросам стальных конструкций. Поэтому мы хотели бы поблагодарить генерального директора СТИСМ г-на Люсьена Валя, руководителя научно-исследовательского отдела г-на Жака Брозетти и директора испытательной станции г-на Поля Арно, позволивших нам широко использовать материалы СТИСМ.

*Авторы*

# Глава 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

## 1.1. ИСТОРИЧЕСКИЙ ОЧЕРК И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

Пожары присущи не только нынешней эпохе. Являясь поистине страшным бедствием, огонь приносил опустошения везде и во все времена. История человечества отмечена катастрофическими пожарами, многие из которых уничтожали целые города — Рим (70 г. до н. э.), Лондон (1666 г.), Москву (1812 г.), Гамбург (1842 г.) и Сан-Франциско (1906 г.). Конечно, отсутствие катастроф такого масштаба в течение последних десятилетий несколько притупило всеобщий страх перед огнем. Однако время от времени та или иная новая трагедия напоминает нам, что эта опасность остается целиком и полностью как Домоклов меч над нами и не ушла в прошлое не только несмотря на огромный технический прогресс, но и в отдельных случаях именно благодаря ему.

Сколь долго огонь угрожает людям, почти столь же долго они пытаются найти от него защиту. Таким образом, защита людей от стихийных бедствий является одной из задач любого правительства. Поэтому именно на правительственных органах всегда лежала задача издания, обнародования и контроля за соблюдением указаний, призванных обеспечить защиту людей от огня. Это очень трудная задача, ибо огонь как явление долго не поддавался, да и сейчас отчасти не поддается человеческому пониманию. Более того, в отличие от воздуха, земли и воды, чей миф человек сумел развеять, огонь мы еще плохо научились покорять, поэтому он всегда вызывает в людях тот же животный и безрассудный страх [1.1].

Однако и в этой области, и в ряде других прогресс приводит к тому, что действие опережает знание. Необходимо было ввести законы, предписывающие те или иные меры, масштабы которых никто не мог себе точно представить, поэтому приходилось издавать их, не зная точно, на что они должны быть направлены и чего касаться. Однако законы продолжали издавать. Так, в 1667 г. королевским указом было предписано покрывать гипсом деревянные каркасы во всех домах Парижа. Эта разумная мера была, по-видимому, одним из первых актов противопожарного нормирования. Интересно то, что она была предпринята через год после величайшего лондонского пожара. И в дальнейшем противопожарное нормирование часто развивалось именно таким образом, т. е. под давлением общественного мнения, потрясенного каким-либо бедствием. Таким образом, рост городского населения и технический прогресс — два фактора, один из которых повышает пожарную опасность, а другой призван ее предотвращать, — не смогли, на наш взгляд, помешать увеличению числа катастрофических пожаров в наше время. Средства массовой информации уделяют много внимания каждой новой трагедии, создавая вокруг нее определенный психологический настрой, что вынуждает законодательные органы принимать все новые и новые меры в дополнение к уже существующим, в связи с чем в настоящее время мы оперируем большим чис-

лом нормативных документов, которые являются столь же обширными, сколь и разнородными, не говоря уже об их недостаточной обоснованности. Чем-то они сродни медицинским трактатам мольеровских докторов, напоминающим рецепты добрых старушек от неизвестных болезней. Кроме того, эти многочисленные новые указания часто издавались с единственной столь же очевидной, сколь и неприглядной демагогической целью успокоить общественное мнение, которое, как известно, всегда готово обвинить власти во всех грехах. Поэтому слишком редко нормативные документы были плодом здравого анализа, который требует полной ясности и времени; в большинстве своем они появлялись в результате жарких споров, разжигающих скудный источник отрывочных качественных сведений, которые имели о пожаре некоторые лица, призванные с ним бороться. По существу, следует признать, что до последнего времени научные знания о пожарах были более чем незначительными по той лишь простой причине, что никто и никогда не заботился об их приобретении, поскольку проблема с полным основанием считалась сложной и для своего решения требовала самой широкой и разнообразной подготовки.

Тем не менее мы далеки от мысли бросать камни в тех, кто разрабатывал и утверждал нормы пожарной безопасности, поскольку потребовалось одновременно много здравого смысла, практического опыта и твердой решимости для создания ныне действующих норм, в которых, следует признать, опыт не входит в противоречие с эффективностью. Однако современные нормы пожарной безопасности можно сравнить с каменными постройками наших пращуров, ибо их прочность обеспечивалась только лишь за счет перерасхода материала, восполнявшего неумение рассчитывать прочность конструкции ... Теперь, когда благодаря широкому международному научному обмену нам это позволяет делать нынешний объем наших знаний, мы должны снести это обветшавшее здание и обратиться к источникам надежности. Эта необходимость становится особенно острой в наше время, когда экономический кризис, охвативший ряд промышленно развитых стран, вынуждает инженера выполнять такие расчеты, в которых стоимость и соответствие нормам (пусть даже и не с учетом надежности), хотя и не всегда равномерно, но тем не менее жестко ощущаются.

Эта новая тенденция характеризуется глобальным подходом к проблеме, учитывающим взаимодействие различных факторов опасности и взаимозависимость мер безопасности. Мы не можем больше игнорировать тот факт, что пожар представляет собой нечто целое, которое нельзя разделить на подпроблемы, решаемые независимо одна от другой с помощью элементарных теорий или на основе субъективного опыта нескольких специалистов. Разумеется, этот новый путь менее удобен, чем предыдущий, ибо он требует одновременного учета всех переменных, а не соблюдения нескольких эмпирических правил. Тем не менее, как доказывают недавние исследования [1.2, 1.3], он отнюдь не является утопией.

Этой новой тенденции благоприятствует, кроме того, новая ориентация научных исследований в области пожарной безопасности, ко-

торые вышли из стадии поисковых экспериментов. По существу, до настоящего времени основное внимание уделялось экспериментам, компенсирувавшем недостаток наших знаний. Теперь же процесс идет в обратном направлении: сначала создают теорию, а затем сопоставляют ее с экспериментальными данными. Будучи более логичным, этот новый образ действий является и более эффективным. К сожалению, новый подход еще нельзя применить во всех областях, например, токсикология остается преимущественно экспериментальной сферой.

В заключение можно сказать, что пожарная безопасность получает сегодня аттестат зрелости, превратившись из совокупности эмпирических приемов в настоящую прикладную науку, которая требует самых широких знаний на высоком уровне.

## 1.2. ПРИНЦИПЫ БЕЗОПАСНОСТИ

Так как пожарная безопасность представляет собой не набор рецептов защиты, а общее логическое понимание опасности, имеющей сложный характер, она должна базироваться на фундаментальных требованиях защиты людей или, в некоторых случаях, материальных ценностей. Есть два принципа безопасности, которые касаются только защиты людей, — пожарная профилактика и пожарная охрана.

Профилактика — это стремление не допустить полного разгорания пожара (см. определение в гл. 2) или ограничить его последствия; пожарная охрана — это обеспечение эвакуации людей и выполнение пожарными своих функций в случае возникновения пожара. Естественно, что первостепенным фактором при охране человеческих жизней является время, причем с этой точки зрения здание считается полностью надежным, если обеспечена немедленная эвакуация из него людей в случае пожара. Таким образом, безопасность определяется несколькими промежутками времени, указанными на рис. 1.1 [1.4].

Следовательно, все меры охраны (а также некоторые меры профилактики) прямо или косвенно направлены на сокращение времени эвакуации и задержки возникновения смертельной опасности. В частности, следует предусматривать число и размеры эвакуационных путей и выходов в зависимости от числа эвакуирующихся по ним людей. Необходимо также, чтобы эти эвакуационные пути не подверга-

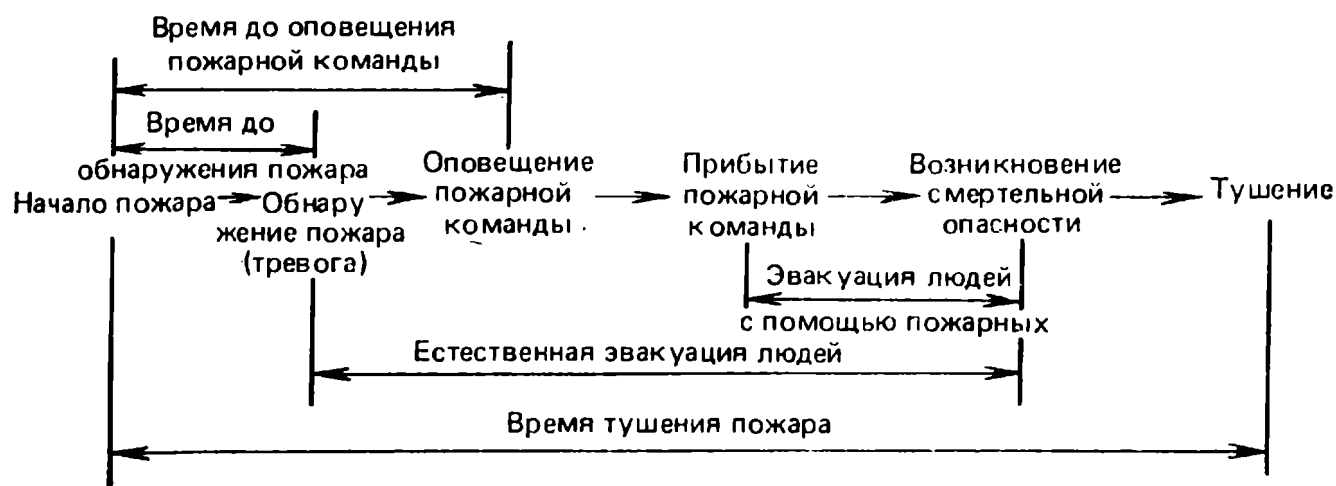


РИС. 1.1. СХЕМА РАЗВИТИЯ ПОЖАРА

лись воздействию тепла, дыма и токсичных газов на протяжении процесса эвакуации и, по возможности, даже дольше с тем, чтобы обеспечить пожарным доступ к очагу пожара и эвакуацию людей, которые могут оставаться в здании в момент прибытия пожарных (раненые, дети, старики, больные и пр.). Для этого в общем случае необходимо, чтобы в течение этого периода здание сохраняло свою целостность, что обеспечивается его огнестойкостью, которая представляет собой важный раздел пожарной безопасности и является предметом настоящей книги.

Кроме того, в некоторых случаях огнестойкость призвана компенсировать недостаточность прямых мер, о которых говорилось выше, — ее роль тем более повышается, чем более затрудненным становится процесс эвакуации.

### 1.3. ОГНЕСТОЙКОСТЬ

Согласно действующим французским нормам [1.5], предел огнестойкости конструкции представляет собой время, зависящее от ответственности здания, его назначения и окружающей его среды и определяется четырьмя критериями: несущей способностью, теплоизоляционной способностью, огнепроницаемостью и отсутствием фильтрации горючих газов<sup>1</sup>.

Элементы конструкций классифицируют по одному или нескольким критериям следующим образом: огнестойкость (SF): критерий 1; защита от огня (PF): критерии 1, 2 и 4; противопожарная преграда (CF): критерии 1, 2, 3 и 4.

Согласно постановлению от 5 января 1959 г. с изменениями, утвержденными 19 декабря 1975 г., проверка соответствия этим критериям производится тремя способами: испытанием, по аналогии и расчетом. Рассмотрим подробнее эти способы.

*Экспериментальная проверка.* Метод испытаний четко определен постановлением от 5 января 1959 г. Так, критерий огнепроницаемости определяют возгоранием куска хлопка вблизи поверхности элемента, не подверженной действию огня. Критерий теплоизоляционной способности определяют за мерами температуры на той же поверхности, причем средняя из всех замеров температур не должна превышать 140 °С и ни одна термopара при этом не должна показывать температуру более 180 °С. Наконец, критерий несущей способности определяют способностью элемента выполнять конструктивную функцию, для которой он предназначен в здании. Если речь идет о несущем элементе, то он должен воспринимать приложенные к нему нагрузки, т. е. не должен обрушиваться или подвергаться чрезмерной деформации. Кроме того, испытания на огнестойкость необходимо обязательно производить в лабораториях, утвержденных для этой цели Министерством внутренних дел, т. е. в лаборатории Научно-технического центра по строительству (C.S.T.B.) в Шан-сюр-Марн или в ла-

---

<sup>1</sup> По стандарту ИСО 834 вместо двух последних используется один критерий — целостность — integrity. (Примеч. науч. ред.)

боратории Ассоциации экспериментальных противопожарных исследований в Мэзьер-ле-Мец, находящейся в ведении Промышленно-технического центра металлических конструкций (СТИСМ) и Межпрофессионального технического объединения строительной промышленности и предприятий общественных работ (UTI).

*Проверка по аналогии.* С 19 декабря 1975 г. вышеуказанным лабораториям дано право присваивать классы PF, CF и SF на основе прежних испытаний, проведенных в тех же лабораториях на сходных материалах.

*Теоретическая проверка.* Постановлением от 19 декабря 1975 г. для проверки огнестойкости элементов конструкции допускается использовать только расчет при условии, что он произведен в соответствии с Единой технической документацией (D.T.U.)<sup>1</sup>. В настоящее время<sup>2</sup> действуют лишь два единых технических документа — по стальным [1.6] и железобетонным конструкциям [1.7]. С помощью этих документов, которые распространяются еще на ограниченный круг конструкций, можно рассчитать лишь класс SF. Кроме того, документы D.T.U. должны учитывать условный характер экспериментальных методов, которые использовались до их введения и действуют и поныне, поэтому необходимо, чтобы расчет давал тот же результат, что и испытание, предусмотренное постановлением. Так, например, в расчетах следует исходить из той же зависимости для стандартного пожара, которая используется при испытаниях, т. е. зависимости температуры от логарифмической функции времени, и весьма отдаленно соответствует развитию температуры при реальном пожаре (гл. 2).

Наконец, время, необходимое для разработки, согласования и утверждения нормативных документов, а также постоянное появление новых публикаций о еще незавершенных исследованиях не позволяют отразить в единых технических документах все последние данные.

#### 1.4. ЦЕЛЬ КНИГИ

Из вышесказанного следует, что для определения огнестойкости конструкции официально допущены лишь два пути — экспериментальный и теоретический, непременно вытекающий из принципов, предусмотренных экспериментальными методами. С учетом такого положения настоящая работа преследует двоякую цель — подробно изложить основные положения единых технических документов, коль они существуют и действуют, и предоставить читателю средства для применения некоторых результатов, еще не включенных в D.T.U. по указанным выше причинам.

---

<sup>1</sup> Единая техническая документация разрабатывается под руководством Группы по координации нормативных документов, созданной 22 июля 1958 г. и охватывающей основные организации, работающие в области строительства во Франции.

<sup>2</sup> Французское издание книги вышло в 1978 г. (*Примеч. пер.*).

## 1.5. ЗНАЧЕНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ

Прежде чем закончить вводную главу, нам хотелось бы обратить внимание читателя на то, что огнестойкость, которая часто необходима для правильного обеспечения безопасности, не является в то же время ни первостепенной мерой, ни панацеей от всех бед. Специалисты по пожарной профилактике выполняют двойную функцию — предотвращение пожара или, когда это становится невозможным, ограничение его последствий (см. разд. 1.2). Чтобы пользоваться верными средствами, они должны представлять себе все опасности, которыми чреват пожар, а их число поистине огромно. Находящемуся в горящем здании человеку угрожает опасность самого различного характера — запоздалый сигнал тревоги, паника, дым, горячие и токсичные газы и пр. Против каждой из этих опасностей следует применять свой комплекс специфических мер профилактики и защиты, эффективность которых зависит также и от других причин опасности. Таким образом, пожарная безопасность представляет собой неделимое целое, в котором огнестойкость играет сложную, но весьма редко первостепенную роль, так как в большинстве случаев она выступает лишь для подкрепления других мер, отнюдь не являясь самоцелью. К тому же, нет необходимости в обеспечении огнестойкости, если эвакуация из здания осуществляется очень быстро или если местное разрушение не влечет за собой нарушения общей устойчивости здания или разрушения препятствий распространению огня (противопожарных преград). Напротив, огнестойкость конструкций становится обязательной, если эвакуация представляет собой достаточно длительный по времени процесс или если обеспечение пожарной безопасности основано на применении систем автоматического пожаротушения или удаления дыма, надежное функционирование которых требует определенной огнестойкости основных, а в отдельных случаях и второстепенных элементов здания.

Наконец, потеря общей устойчивости или обрушение стальных, железобетонных или деревянных конструкций происходит при значительно более высоких температурах, чем та, которую может выдержать человеческий организм. Поэтому обрушение конструкций не может произойти в помещении, где еще находятся живые люди, за исключением случаев, когда частичное разрушение приводит к полному обрушению здания вследствие потери прочности или общей устойчивости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1.1] G. Bachelard. — *La psychanalyse du feu*, éditions Gallimard 1949.
- [1.2] H. E. Nelson. — *The application of systems analysis to building fire safety design*, National Bureau of Standards, Washington D. C., U. S. A.
- [1.3] M. Gretener. — *Détermination des mesures de protection découlant de l'évaluation du danger potentiel d'incendie*, Service de Prévention d'incendie pour l'Industrie et l'Artisanat, Neuchatel, Suisse.
- [1.4] Les bases de la Sécurité Incendie par un groupe de réflexion du CSTB. Cahier n° 1325 du Centre Scientifique et technique du bâtiment, Paris.

[1.5] Sécurité Contre l'Incendie. — Brochure n° 1011 des Journaux Officiels, 26 rue Desaix, 75732 Paris, CEDEX 15.

[1.6] C. T. I. C. M. — *Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en acier*, Revue Construction Métallique n° 4, 1976, CTICM, Puteaux, France.

[1.7] Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton. — Cahier du C. S. T. B. n° 1270.

[1.8] O. Pettersoon, S. E. Magnusson, J. Thor. — *Fire Engineering design of Steel Structures*, Swedish Institute of Steel construction, Stockholm, Sweden, 1976.

[1.9] J. L. Pauls. — *Evacuation and other Fire safety measures in high-rise buildings*, National Research Council, Ottawa, Canada.

[1.10] K. Togawa. — *Study on fire escape based on the observation of multitude currents*, Building research Institute, Tokyo, Japan.

[1.11] S. J. Melinek, S. Booth. — *An analysis of evacuation times and the movement of crowds in buildings*, Fire Research Station, Borehamwood, Hertfordshire WD6 2BL, England.

[1.12] M. Galbreath. — *Time of evacuation by stairs in high-rise buildings*, National Research Council, Ottawa, Canada.

[1.13] М. Я. Ройтман. Основы противопожарного нормирования в строительстве. М., Изд-во литературы по строительству, 1969.

## Глава 2. ПОЖАР

### 2.1. ЗНАЧЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Пожар представляет собой весьма сложное явление, еще плохо поддающееся укрощению, так как при этом выступают многочисленные факторы и случайные законы их взаимодействия. Однако, как было отмечено в гл. 1, огнестойкость является лишь частью общей проблемы пожарной безопасности, в связи с чем ее расчет не требует знаний о ходе всего процесса. Поэтому нас будет интересовать только стадия полного развития пожара и мы будем рассматривать только ее тепловые воздействия.

### 2.2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В течение последних 20 лет как во Франции [2.1, 2.2], так и за рубежом [2.3, 2.4] проведено большое число различных испытаний с целью расширения знаний о процессе пожара. Отдельные эксперименты были проведены в зданиях, предназначенных к сносу, однако большинство испытаний выполнялось в специальных секциях. Кроме того, по финансовым соображениям многие испытания проводились на сравнительно малых моделях.

Все результаты этих испытаний показывают, что основными факторами, оказывающими влияние на стадию полного развития пожара, являются:

пожарная нагрузка, т. е. общее количество сгораемых материалов в помещении, которая называется также тепловой нагрузкой или тепловым потенциалом. Ее роль зависит от природы, местоположения и количества каждого из сгораемых материалов;

воздухообмен, т. е. приток свежего воздуха к очагу горения. Воздухообмен является функцией высоты здания, его геометрических и планировочных параметров, а также количества и распределения проемов как вертикальных (дверей и окон), так и горизонтальных (в покрытии);

природа материала стен и покрытий помещения, охваченного пожаром, которая обуславливает их теплоизоляционные свойства, а иногда и способствует повышению пожарной нагрузки.

Разумеется, этот перечень не является исчерпывающим, и можно указать другие факторы, имеющие меньшее значение. Речь идет, в частности, об атмосферных условиях, геометрических характеристиках помещения и его сообщении со смежными помещениями. Эти две группы факторов обычно не учитываются. И действительно, первая из них играет случайную роль, которую мы не в состоянии выразить количественно (вероятностный подход к пожарной безопасности

Т а б л и ц а 2.1

| № испытания | Пожарная нагрузка, кг/м <sup>2</sup> | Проемность, % | Примечания                                                                                                                                                   |
|-------------|--------------------------------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1           | 30                                   | 10            | Пожарная нагрузка, равномерно распределенная по площади пола секции                                                                                          |
| 2           | 15                                   | 25            |                                                                                                                                                              |
| 3           | 30                                   | 25            |                                                                                                                                                              |
| 4           | 60                                   | 25            |                                                                                                                                                              |
| 5           | 15                                   | 40            |                                                                                                                                                              |
| 6           | 30                                   | 40            |                                                                                                                                                              |
| 7           | 60                                   | 40            |                                                                                                                                                              |
| 8           | 15                                   | 60            |                                                                                                                                                              |
| 9           | 30                                   | 60            |                                                                                                                                                              |
| 10          | 60                                   | 60            |                                                                                                                                                              |
| 11          | 15                                   | 25            | Пожарная нагрузка, действующая на площади 1 м <sup>2</sup> в центре секции                                                                                   |
| 12          | 30                                   | 25            |                                                                                                                                                              |
| 13          | 30                                   | 40            |                                                                                                                                                              |
| 14          | 30                                   | 10            | Пожарная нагрузка, равномерно распределенная по площади пола секции, на внутренние поверхности которой нанесена (набрызгом) изоляция в виде слоя вермикулита |
| 15          | 15                                   | 25            |                                                                                                                                                              |
| 16          | 20                                   | 25            |                                                                                                                                                              |
| 17          | 30                                   | 25            |                                                                                                                                                              |
| 18          | 30                                   | 25            |                                                                                                                                                              |
| 19          | 30                                   | 25            |                                                                                                                                                              |
| 20          | 40                                   | 25            |                                                                                                                                                              |
| 21          | 60                                   | 25            |                                                                                                                                                              |
| 22          | 15                                   | 40            |                                                                                                                                                              |
| 23          | 20                                   | 40            |                                                                                                                                                              |
| 24          | 25                                   | 40            |                                                                                                                                                              |
| 25          | 30                                   | 40            |                                                                                                                                                              |
| 26          | 40                                   | 40            |                                                                                                                                                              |
| 27          | 60                                   | 40            |                                                                                                                                                              |
| 28          | 15                                   | 60            |                                                                                                                                                              |
| 29          | 20                                   | 60            |                                                                                                                                                              |
| 30          | 30                                   | 60            |                                                                                                                                                              |
| 31          | 60                                   | 60            |                                                                                                                                                              |

Температура ( $^{\circ}\text{C}$ )

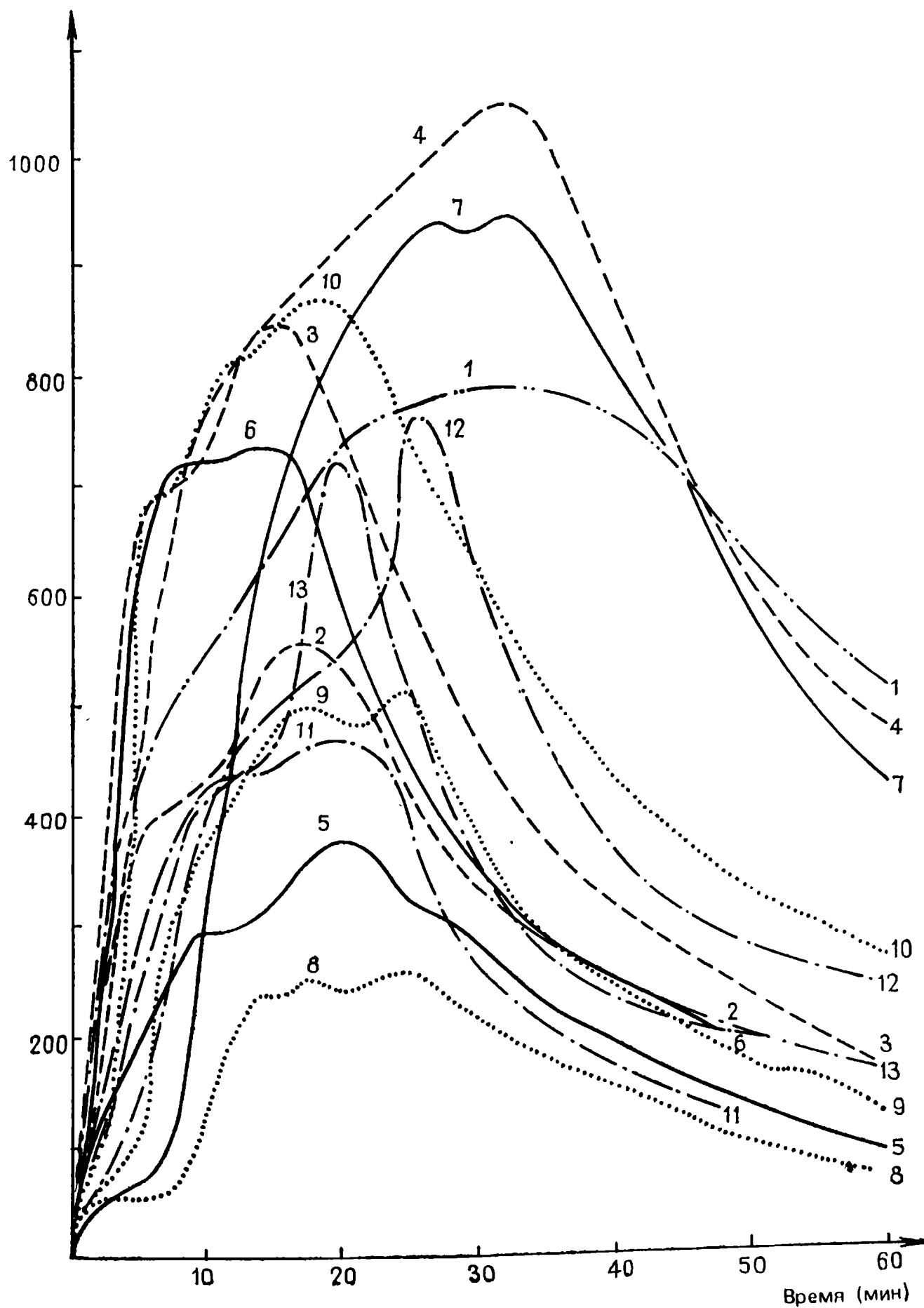


РИС. 2.1

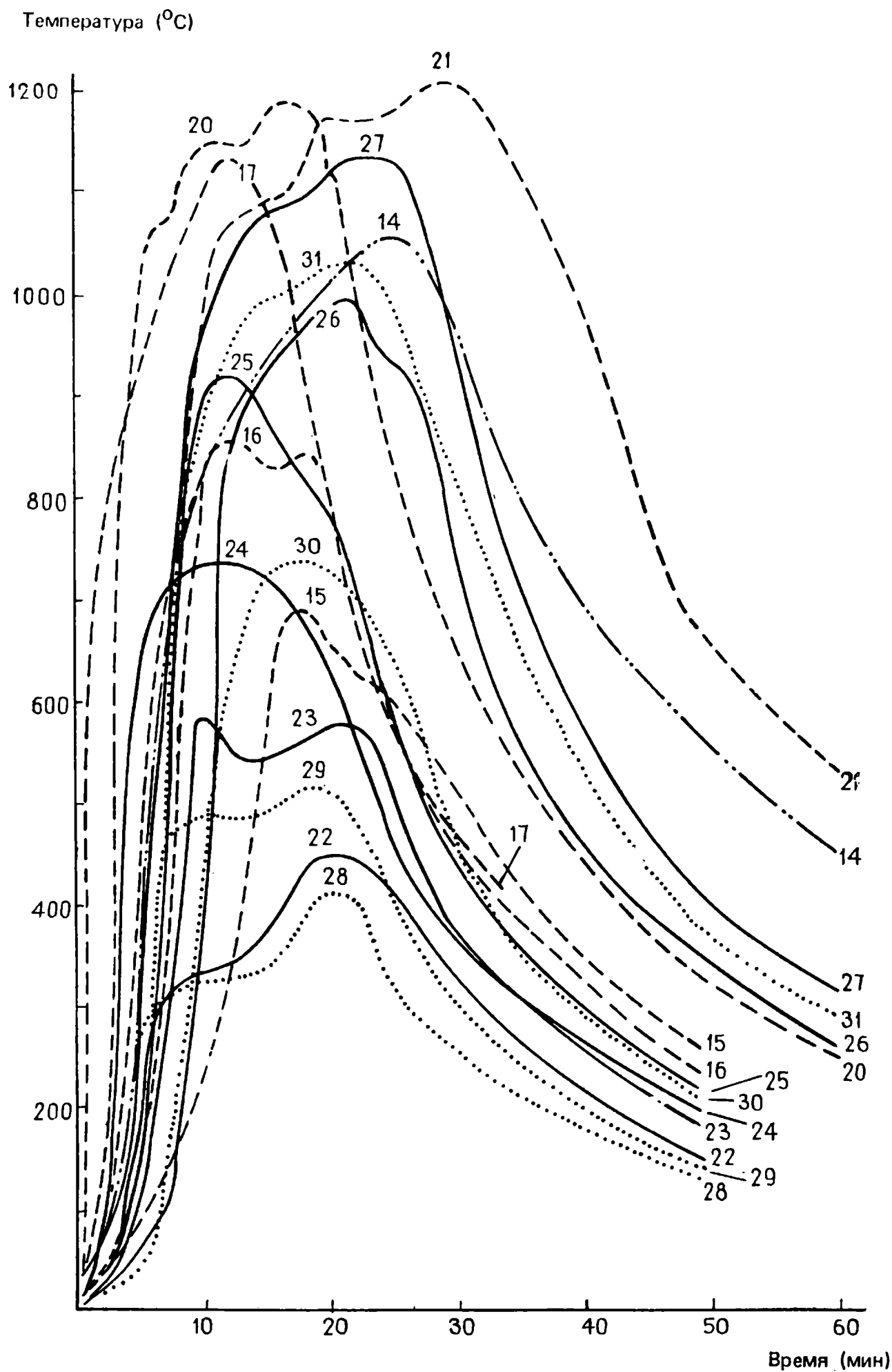


Рис. 2.2

в настоящее время только начинает развиваться), в то время как вторая группа факторов оказывает влияние скорее на распространение пожара, чем на его развитие в помещении, где он начался.

Данные табл. 2.1, составленной на основе многочисленных испытаний, проведенных во Франции [2.1], подтверждают и уточняют вышесказанное. Эти испытания проводились в экспериментальной секции длиной 3,68 м, шириной 3,38 м и высотой 3,13 м. Боковые стены были выполнены из обычного кирпича толщиной 11,5 см (с наружной стороны) и огнестойкого шамотного кирпича толщиной 16 см (с внутренней стороны). Лицевая сторона секции (ширина 3,38 м) была выполнена не из кирпича, а в виде съемных плит толщиной 17,5 см, выполненных из легкого бетона, что позволяло легко создавать проемы различных размеров. Принятый в этих испытаниях параметр — проемность, характеризующий воздухообмен, представлял собой отношение площади проема к площади лицевой поверхности секции. Следует отметить, что такой параметр не лучшим образом характеризует воздухообмен. Целесообразнее использовать выражение  $(A\sqrt{H}/A_t)$  — коэффициент проемности, где  $A$  и  $H$  — соответственно площадь и высота проема, а  $A_t$  — полная площадь всех ограждений помещения. В табл. 2.2 для тех же испытаний приведены зависимости между обоими параметрами.

Т а б л и ц а 2.2

| %  | $H$  | $A$  | $A\sqrt{H}/A_t$ |
|----|------|------|-----------------|
| 10 | 0,9  | 1,06 | 0,015           |
| 25 | 2,18 | 2,58 | 0,055           |
| 40 | 2,18 | 4,25 | 0,091           |
| 60 | 2,92 | 6,34 | 0,157           |

Наконец, в качестве горючего при этих испытаниях использовалась сосновая дранка.

Некоторые испытания были проведены после нанесения внутреннего покрытия из раствора на основе вермикулита толщиной 2,5 см. Это в значительной степени ограничивало теплопередачу через стенку и позволяло имитировать условия помещения больших размеров. Можно отметить, что в этом случае имеет место более интенсивный огонь. На рис. 2.1 и 2.2 приведены графики зависимости температура—время, полученные при каждом из проведенных испытаний.

В первом приближении эти данные можно экстраполировать на помещения аналогичных размеров (например, жилые помещения), результатами испытаний № 14—31 пользоваться следует с осторожностью. Оценку пожарной нагрузки можно производить в соответствии с указаниями разд. 2.5.

## 2.3. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФОРМУЛИРОВКА

Для учета стадии полного развития пожара в изолированном помещении рассматривают в каждый момент времени тепловой баланс данного помещения (рис. 2.3), который выражается следующим образом [2.5]: количество тепла  $Q_c$ , выделяемое в каждый момент времени при горении, равно сумме количества тепла  $Q_1$ , отводимого вместе с выходящими из помещения газами, количества тепла  $Q_2$ , проходящего через ограждения помещения, и количества тепла  $Q_3$ , излучаемого через проемы.

Насколько просто определить величины  $Q_1$ ,  $Q_2$  и  $Q_3$  с помощью нескольких упрощающих гипотез, настолько сложно найти величину  $Q_c$ , которая зависит от вида горючего материала (его природы, количества, обработки), а также от окружающей его среды (размеров помещения, при-

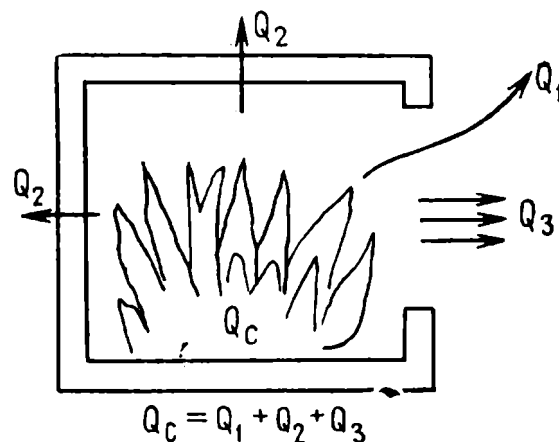


рис. 2.3

тока свежего воздуха). Однако уже сейчас существует несколько программ решения уравнения теплового баланса с помощью ЭВМ в случае, когда в качестве горючего используют дерево, а размеры помещений слишком малы для того, чтобы можно было еще пользоваться гипотезой о равномерности температуры газов [2.5, 2.6, 2.7].

## 2.4. ПРАКТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

Применение ЭВМ затрудняет оперирование уравнением теплового баланса в проектном бюро, поэтому к методам автоматизированного расчета следует прибегать лишь в особых, обоснованных случаях. В общем же случае можно пользоваться приведенными ниже данными, что дает выигрыш во времени, хотя и в ущерб точности.

**2.4.1. Температура в эталонном помещении.** Систематическое применение расчета на ЭВМ, а также сопоставление его результатов с экспериментальными данными позволили получить для случая свободного горения пожара значения температур, достигаемых в эталонном помещении, при различных пожарных нагрузках и проемах [2.8]. Стенки эталонного помещения выполнены из обычного и легкого бетона, причем их средняя теплопроводность составляет  $\lambda = 0,7$  ккал/(м·ч·°C), а средняя объемная удельная теплоемкость  $C_p \rho = 400$  ккал/(м<sup>3</sup>·°C).

В табл. 2.3—2.9 приведены значения максимальных температур в помещении в зависимости от коэффициента проемности, пожарной нагрузки и времени.

Данные этих таблиц можно использовать в случаях, когда стены выполнены из обычного или легкого бетона, кирпича или других материалов с близкими термическими свойствами. Пожарная нагрузка  $q$  выражается в Мкал или МДж на 1 м<sup>2</sup> суммарной поверхности ограждений помещения ( $A_i$ ).

Таблица 2.3

| t, ч | $A\sqrt{H}/A_t = 0,1 \text{ м}^{1/2} \text{ при}$ |      |      |      |       |      |      |     |
|------|---------------------------------------------------|------|------|------|-------|------|------|-----|
|      | q, Мкал/м²                                        |      |      |      |       |      |      |     |
|      | 1,5                                               | 3    | 4,5  | 7,5  | 11,25 | 15   | 22,5 | 30  |
|      | q, МДж/м²                                         |      |      |      |       |      |      |     |
|      | 6,3                                               | 12,6 | 13,8 | 31,4 | 47,1  | 62,8 | 94,2 | 126 |
| 0,05 | 272                                               | 272  | 272  | 272  | 272   | 272  | 272  | 272 |
| 0,1  | 395                                               | 395  | 395  | 395  | 328   | 328  | 328  | 328 |
| 0,15 | 228                                               | 390  | 390  | 390  | 360   | 360  | 360  | 360 |
| 0,2  | 196                                               | 368  | 401  | 401  | 406   | 406  | 406  | 406 |
| 0,25 | 150                                               | 313  | 409  | 410  | 405   | 405  | 405  | 405 |
| 0,3  | 98                                                | 257  | 385  | 421  | 415   | 415  | 415  | 415 |
| 0,35 | 97                                                | 241  | 354  | 429  | 425   | 425  | 425  | 425 |
| 0,4  | 94                                                | 218  | 320  | 437  | 434   | 434  | 434  | 434 |
| 0,45 | 91                                                | 193  | 282  | 441  | 442   | 442  | 442  | 442 |
| 0,5  | 88                                                | 167  | 269  | 412  | 449   | 449  | 449  | 449 |
| 0,6  | 82                                                | 157  | 229  | 370  | 463   | 463  | 463  | 463 |
| 0,65 | 79                                                | 150  | 215  | 355  | 460   | 470  | 470  | 470 |
| 0,7  | 75                                                | 144  | 187  | 314  | 451   | 476  | 476  | 476 |
| 0,8  | 69                                                | 131  | 178  | 302  | 426   | 488  | 488  | 488 |
| 0,9  | 61                                                | 118  | 166  | 283  | 399   | 468  | 500  | 500 |
| 1    | 54                                                | 104  | 154  | 263  | 367   | 456  | 511  | 511 |
| 1,1  | 46                                                | 89   | 142  | 242  | 344   | 439  | 521  | 521 |
| 1,2  | 45                                                | 74   | 129  | 218  | 331   | 421  | 531  | 531 |
| 1,3  | 43                                                | 71   | 116  | 209  | 315   | 400  | 524  | 541 |
| 1,4  | 42                                                | 68   | 102  | 199  | 299   | 376  | 524  | 550 |
| 1,5  | 41                                                | 65   | 88   | 190  | 282   | 366  | 522  | 559 |
| 1,6  | 40                                                | 63   | 85   | 180  | 263   | 353  | 515  | 567 |
| 1,7  | 39                                                | 61   | 81   | 170  | 244   | 340  | 506  | 559 |
| 1,8  | 38                                                | 59   | 79   | 160  | 237   | 326  | 496  | 562 |
| 1,9  | 37                                                | 58   | 76   | 150  | 230   | 311  | 485  | 561 |
| 2    | 36                                                | 56   | 74   | 139  | 223   | 296  | 473  | 560 |
| 2,2  | 35                                                | 53   | 70   | 117  | 210   | 263  | 448  | 552 |
| 2,4  | 34                                                | 51   | 66   | 103  | 197   | 249  | 422  | 542 |
| 2,6  | 33                                                | 49   | 63   | 97   | 185   | 235  | 393  | 529 |
| 2,8  | 32                                                | 47   | 61   | 92   | 172   | 221  | 361  | 514 |
| 3    | 32                                                | 46   | 59   | 87   | 159   | 207  | 327  | 497 |
| 3,2  |                                                   | 44   | 56   | 83   | 146   | 194  | 301  | 480 |
| 3,4  |                                                   | 43   | 55   | 80   | 132   | 181  | 286  | 461 |
| 3,6  |                                                   | 42   | 53   | 77   | 118   | 168  | 273  | 441 |
| 3,8  |                                                   | 41   | 52   | 75   | 109   | 154  | 261  | 419 |
| 4    |                                                   | 40   | 50   | 72   | 104   | 140  | 249  | 396 |
| 4,2  |                                                   | 39   | 49   | 70   | 100   | 125  | 238  | 371 |
| 4,4  |                                                   | 39   | 48   | 68   | 96    | 119  | 227  | 345 |
| 4,6  |                                                   | 38   | 47   | 66   | 93    | 114  | 216  | 323 |
| 4,8  |                                                   | 37   | 46   | 65   | 90    | 110  | 205  | 307 |
| 5    |                                                   | 37   | 45   | 63   | 87    | 106  | 194  | 292 |
| 5,2  |                                                   | 36   | 44   | 62   | 85    | 103  | 184  | 277 |
| 5,4  |                                                   | 35   | 43   | 60   | 82    | 100  | 173  | 262 |
| 5,6  |                                                   | 35   | 42   | 59   | 80    | 97   | 162  | 247 |
| 5,8  |                                                   | 35   | 42   | 58   | 78    | 94   | 151  | 231 |
| 6    |                                                   | 34   | 41   | 57   | 77    | 92   | 140  | 216 |

Таблица 2.4

| t, ч | $A\sqrt{H}/A_t = 0,02 \text{ м}^{1/2} \text{ при}$ |      |      |      |      |     |     |     |
|------|----------------------------------------------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|
|      | q, Мкал/м²                                         |      |      |      |      |     |     |     |
|      | 3                                                  | 6    | 9    | 15   | 22,5 | 30  | 45  | 60  |
|      | q, МДж/м²                                          |      |      |      |      |     |     |     |
|      | 12,6                                               | 25,1 | 37,7 | 62,8 | 94,2 | 126 | 188 | 251 |
| 0,05 | 396                                                | 396  | 396  | 396  | 397  | 397 | 397 | 398 |
| 0,1  | 568                                                | 568  | 568  | 568  | 467  | 467 | 467 | 467 |
| 0,15 | 322                                                | 556  | 556  | 556  | 511  | 511 | 511 | 511 |
| 0,2  | 277                                                | 519  | 572  | 572  | 581  | 581 | 581 | 581 |
| 0,25 | 210                                                | 450  | 585  | 587  | 578  | 578 | 578 | 578 |
| 0,3  | 134                                                | 361  | 549  | 602  | 593  | 593 | 593 | 593 |
| 0,35 | 131                                                | 339  | 501  | 615  | 615  | 615 | 615 | 615 |
| 0,4  | 126                                                | 304  | 452  | 624  | 620  | 620 | 620 | 620 |
| 0,45 | 121                                                | 268  | 397  | 632  | 632  | 632 | 632 | 632 |
| 0,5  | 117                                                | 228  | 376  | 586  | 642  | 642 | 642 | 642 |
| 0,6  | 107                                                | 212  | 317  | 523  | 662  | 662 | 662 | 662 |
| 0,65 | 102                                                | 201  | 287  | 485  | 660  | 671 | 671 | 671 |
| 0,7  | 98                                                 | 193  | 254  | 440  | 642  | 680 | 680 | 680 |
| 0,8  | 88                                                 | 174  | 239  | 419  | 604  | 697 | 697 | 697 |
| 0,9  | 77                                                 | 154  | 220  | 390  | 562  | 666 | 714 | 714 |
| 1    | 66                                                 | 132  | 202  | 359  | 513  | 645 | 729 | 729 |
| 1,1  | 54                                                 | 109  | 184  | 325  | 475  | 618 | 742 | 742 |
| 1,2  | 51                                                 | 86   | 165  | 289  | 453  | 588 | 756 | 756 |
| 1,3  | 49                                                 | 82   | 144  | 275  | 429  | 555 | 743 | 768 |
| 1,4  | 47                                                 | 79   | 123  | 260  | 402  | 517 | 740 | 779 |
| 1,5  | 45                                                 | 75   | 101  | 244  | 375  | 498 | 735 | 790 |
| 1,6  | 44                                                 | 72   | 97   | 229  | 347  | 478 | 721 | 800 |
| 1,7  | 43                                                 | 70   | 93   | 214  | 316  | 456 | 706 | 787 |
| 1,8  | 42                                                 | 67   | 89   | 199  | 305  | 434 | 688 | 788 |
| 1,9  | 40                                                 | 65   | 86   | 184  | 294  | 410 | 669 | 784 |
| 2    | 40                                                 | 63   | 83   | 168  | 284  | 386 | 648 | 780 |
| 2,2  | 38                                                 | 59   | 78   | 135  | 263  | 335 | 605 | 763 |
| 2,4  | 36                                                 | 56   | 73   | 113  | 244  | 312 | 562 | 743 |
| 2,6  | 35                                                 | 53   | 70   | 106  | 225  | 291 | 515 | 719 |
| 2,8  | 34                                                 | 51   | 66   | 99   | 206  | 270 | 465 | 692 |
| 3    | 33                                                 | 49   | 63   | 94   | 187  | 250 | 410 | 662 |
| 3,2  | 32                                                 | 47   | 61   | 89   | 168  | 230 | 370 | 632 |
| 3,4  | 31                                                 | 46   | 58   | 85   | 148  | 210 | 348 | 601 |
| 3,6  | 31                                                 | 44   | 56   | 81   | 128  | 191 | 328 | 568 |
| 3,8  | 30                                                 | 43   | 54   | 78   | 114  | 172 | 309 | 533 |
| 4    | 30                                                 | 42   | 52   | 75   | 108  | 151 | 293 | 496 |
| 4,2  |                                                    | 41   | 51   | 73   | 103  | 130 | 276 | 457 |
| 4,4  |                                                    | 40   | 49   | 71   | 99   | 123 | 261 | 417 |
| 4,6  |                                                    | 39   | 48   | 68   | 95   | 117 | 245 | 384 |
| 4,8  |                                                    | 38   | 47   | 66   | 91   | 112 | 229 | 360 |
| 5    |                                                    | 37   | 46   | 64   | 88   | 107 | 214 | 337 |
| 5,2  |                                                    | 36   | 45   | 63   | 85   | 103 | 199 | 314 |
| 5,4  |                                                    | 36   | 44   | 61   | 83   | 100 | 184 | 293 |
| 5,6  |                                                    | 35   | 43   | 59   | 80   | 96  | 169 | 271 |
| 5,8  |                                                    | 35   | 42   | 58   | 78   | 93  | 154 | 250 |
| 6    |                                                    | 34   | 41   | 56   | 76   | 91  | 138 | 228 |

Таблица 2.5

| t, ч | $A\sqrt{H}/A_t = 0,04 \text{ м}^{1/2} \text{ при}$ |     |     |     |     |     |     |      |
|------|----------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
|      | q, Мкал/м²                                         |     |     |     |     |     |     |      |
|      | 6                                                  | 12  | 18  | 30  | 45  | 60  | 90  | 120  |
|      | q, МДж/м²                                          |     |     |     |     |     |     |      |
|      | 25                                                 | 50  | 75  | 126 | 188 | 251 | 377 | 502  |
| 0,05 | 504                                                | 504 | 504 | 504 | 504 | 504 | 504 | 504  |
| 0,1  | 745                                                | 745 | 745 | 745 | 621 | 621 | 621 | 621  |
| 0,15 | 422                                                | 747 | 747 | 747 | 681 | 681 | 681 | 681  |
| 0,2  | 360                                                | 696 | 767 | 767 | 777 | 777 | 777 | 777  |
| 0,25 | 268                                                | 587 | 784 | 784 | 776 | 776 | 776 | 776  |
| 0,3  | 164                                                | 472 | 734 | 799 | 793 | 793 | 793 | 793  |
| 0,35 | 162                                                | 437 | 665 | 814 | 808 | 808 | 808 | 808  |
| 0,4  | 155                                                | 389 | 593 | 828 | 822 | 822 | 822 | 822  |
| 0,45 | 148                                                | 337 | 513 | 841 | 836 | 836 | 836 | 836  |
| 0,5  | 142                                                | 281 | 481 | 779 | 848 | 848 | 848 | 848  |
| 0,6  | 128                                                | 259 | 397 | 682 | 874 | 874 | 874 | 874  |
| 0,65 | 120                                                | 246 | 352 | 626 | 882 | 882 | 882 | 882  |
| 0,7  | 114                                                | 232 | 307 | 565 | 839 | 894 | 894 | 894  |
| 0,8  | 100                                                | 204 | 285 | 527 | 785 | 912 | 912 | 912  |
| 0,9  | 86                                                 | 178 | 260 | 483 | 720 | 862 | 928 | 928  |
| 1    | 71                                                 | 149 | 235 | 437 | 645 | 827 | 942 | 942  |
| 1,1  | 54                                                 | 118 | 208 | 388 | 589 | 787 | 955 | 955  |
| 1,2  | 51                                                 | 85  | 183 | 337 | 555 | 740 | 967 | 967  |
| 1,3  | 49                                                 | 82  | 156 | 316 | 518 | 688 | 942 | 977  |
| 1,4  | 46                                                 | 77  | 128 | 296 | 480 | 632 | 931 | 987  |
| 1,5  | 45                                                 | 74  | 98  | 276 | 441 | 602 | 919 | 996  |
| 1,6  | 43                                                 | 70  | 94  | 255 | 400 | 571 | 895 | 1004 |
| 1,7  | 41                                                 | 68  | 89  | 235 | 358 | 540 | 870 | 981  |
| 1,8  | 40                                                 | 65  | 85  | 214 | 343 | 507 | 843 | 973  |
| 1,9  | 39                                                 | 62  | 82  | 194 | 328 | 474 | 813 | 963  |
| 2    | 38                                                 | 60  | 79  | 174 | 313 | 440 | 781 | 953  |
| 2,2  | 36                                                 | 56  | 73  | 131 | 288 | 369 | 718 | 923  |
| 2,4  | 35                                                 | 52  | 69  | 104 | 263 | 339 | 655 | 890  |
| 2,6  | 33                                                 | 50  | 64  | 96  | 238 | 311 | 587 | 853  |
| 2,8  | 32                                                 | 47  | 61  | 90  | 214 | 286 | 516 | 813  |
| 3    | 31                                                 | 45  | 57  | 84  | 190 | 261 | 442 | 769  |
| 3,2  |                                                    | 43  | 55  | 80  | 166 | 236 | 388 | 727  |
| 3,4  |                                                    | 42  | 52  | 76  | 141 | 211 | 362 | 682  |
| 3,6  |                                                    | 40  | 50  | 72  | 115 | 187 | 338 | 635  |
| 3,8  |                                                    | 39  | 48  | 69  | 99  | 163 | 316 | 587  |
| 4    |                                                    | 38  | 47  | 66  | 94  | 137 | 296 | 537  |
| 4,2  |                                                    | 37  | 45  | 64  | 89  | 110 | 277 | 485  |
| 4,4  |                                                    | 36  | 44  | 61  | 85  | 104 | 258 | 431  |
| 4,6  |                                                    | 35  | 42  | 59  | 81  | 99  | 240 | 388  |
| 4,8  |                                                    | 34  | 41  | 57  | 78  | 94  | 221 | 360  |
| 5    |                                                    | 33  | 40  | 55  | 75  | 90  | 204 | 332  |
| 5,2  |                                                    |     | 39  | 53  | 73  | 87  | 186 | 305  |
| 5,4  |                                                    |     | 38  | 52  | 70  | 83  | 168 | 280  |
| 5,6  |                                                    |     | 37  | 50  | 68  | 81  | 150 | 255  |
| 5,8  |                                                    |     | 37  | 49  | 66  | 78  | 131 | 229  |
| 6    |                                                    |     | 36  | 48  | 64  | 75  | 111 | 203  |

Таблица 2.6

| t, ч | $A\sqrt{H}/A_t = 0,06 \text{ м}^{1/2} \text{ при}$ |     |     |     |      |      |      |      |
|------|----------------------------------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
|      | q, Мкал/м²                                         |     |     |     |      |      |      |      |
|      | 9                                                  | 18  | 27  | 45  | 67,5 | 90   | 135  | 180  |
|      | q, МДж/м²                                          |     |     |     |      |      |      |      |
|      | 38                                                 | 75  | 113 | 188 | 283  | 377  | 565  | 753  |
| 0,5  | 575                                                | 575 | 575 | 575 | 575  | 575  | 575  | 575  |
| 0,1  | 858                                                | 858 | 858 | 858 | 704  | 704  | 704  | 704  |
| 0,15 | 493                                                | 861 | 861 | 861 | 784  | 784  | 784  | 784  |
| 0,2  | 404                                                | 802 | 879 | 879 | 882  | 882  | 882  | 882  |
| 0,25 | 296                                                | 679 | 898 | 898 | 889  | 889  | 889  | 890  |
| 0,3  | 175                                                | 538 | 838 | 914 | 908  | 908  | 908  | 908  |
| 0,35 | 174                                                | 490 | 761 | 928 | 923  | 923  | 923  | 923  |
| 0,4  | 166                                                | 430 | 669 | 942 | 936  | 936  | 937  | 937  |
| 0,45 | 159                                                | 369 | 572 | 954 | 949  | 949  | 949  | 949  |
| 0,5  | 151                                                | 303 | 532 | 877 | 961  | 961  | 961  | 961  |
| 0,6  | 136                                                | 277 | 433 | 762 | 982  | 982  | 982  | 982  |
| 0,65 | 128                                                | 262 | 402 | 694 | 992  | 992  | 992  | 992  |
| 0,7  | 120                                                | 247 | 326 | 620 | 939  | 1001 | 1001 | 1001 |
| 0,8  | 104                                                | 215 | 300 | 574 | 872  | 1018 | 1018 | 1018 |
| 0,9  | 89                                                 | 185 | 272 | 520 | 795  | 954  | 1032 | 1032 |
| 1    | 71                                                 | 152 | 243 | 466 | 705  | 909  | 1044 | 1044 |
| 1,1  | 51                                                 | 116 | 213 | 409 | 637  | 858  | 1054 | 1054 |
| 1,2  | 48                                                 | 80  | 184 | 343 | 593  | 803  | 1064 | 1064 |
| 1,3  | 45                                                 | 76  | 155 | 327 | 550  | 742  | 1029 | 1072 |
| 1,4  | 43                                                 | 72  | 123 | 303 | 505  | 675  | 1013 | 1080 |
| 1,5  | 41                                                 | 68  | 89  | 281 | 460  | 640  | 996  | 1087 |
| 1,6  | 40                                                 | 65  | 86  | 259 | 413  | 603  | 966  | 1093 |
| 1,7  | 38                                                 | 62  | 81  | 236 | 364  | 567  | 935  | 1062 |
| 1,8  | 37                                                 | 59  | 78  | 213 | 348  | 529  | 902  | 1049 |
| 1,9  | 36                                                 | 56  | 74  | 191 | 332  | 491  | 866  | 1036 |
| 2    | 35                                                 | 54  | 71  | 169 | 317  | 452  | 830  | 1022 |
| 2,2  | 33                                                 | 50  | 66  | 121 | 289  | 371  | 756  | 984  |
| 2,4  | 32                                                 | 37  | 61  | 93  | 263  | 340  | 683  | 943  |
| 2,6  | 31                                                 | 44  | 57  | 85  | 236  | 310  | 605  | 900  |
| 2,8  | 30                                                 | 42  | 54  | 79  | 210  | 283  | 524  | 854  |
| 3    | 29                                                 | 40  | 51  | 74  | 185  | 257  | 440  | 805  |
| 3,2  |                                                    | 39  | 48  | 70  | 159  | 230  | 381  | 756  |
| 3,4  |                                                    | 37  | 46  | 67  | 131  | 204  | 355  | 705  |
| 3,6  |                                                    | 36  | 44  | 63  | 103  | 178  | 331  | 652  |
| 3,8  |                                                    | 35  | 42  | 60  | 86   | 152  | 308  | 597  |
| 4    |                                                    | 34  | 41  | 57  | 81   | 123  | 288  | 541  |
| 4,2  |                                                    | 33  | 40  | 55  | 77   | 95   | 269  | 483  |
| 4,4  |                                                    | 32  | 38  | 53  | 73   | 90   | 249  | 423  |
| 4,6  |                                                    | 31  | 37  | 51  | 70   | 85   | 230  | 377  |
| 4,8  |                                                    | 31  | 36  | 49  | 67   | 81   | 211  | 348  |
| 5    |                                                    | 30  | 35  | 47  | 64   | 77   | 193  | 319  |
| 5,2  |                                                    |     | 35  | 46  | 62   | 74   | 174  | 292  |
| 5,4  |                                                    |     | 34  | 44  | 59   | 71   | 155  | 265  |
| 5,6  |                                                    |     | 33  | 43  | 57   | 69   | 135  | 238  |
| 5,8  |                                                    |     | 32  | 42  | 55   | 66   | 114  | 210  |
| 6    |                                                    |     | 32  | 41  | 54   | 64   | 94   | 195  |

Таблица 2.7

| t, ч | $A\sqrt{H}/A_t = 0,08 \text{ м}^{1/2} \text{ при}$ |     |     |      |      |      |      |      |
|------|----------------------------------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|
|      | q, Мкал/м²                                         |     |     |      |      |      |      |      |
|      | 12                                                 | 24  | 36  | 60   | 90   | 120  | 180  | 240  |
|      | q, МДж/м²                                          |     |     |      |      |      |      |      |
|      | 50                                                 | 100 | 151 | 251  | 377  | 502  | 754  | 1004 |
| 0,05 | 622                                                | 622 | 622 | 622  | 622  | 622  | 622  | 622  |
| 0,1  | 935                                                | 935 | 935 | 935  | 766  | 766  | 766  | 767  |
| 0,15 | 532                                                | 937 | 937 | 937  | 853  | 853  | 853  | 853  |
| 0,2  | 432                                                | 869 | 955 | 955  | 959  | 959  | 959  | 959  |
| 0,25 | 314                                                | 734 | 973 | 973  | 965  | 965  | 965  | 965  |
| 0,3  | 181                                                | 575 | 903 | 987  | 381  | 981  | 981  | 982  |
| 0,35 | 180                                                | 521 | 818 | 1001 | 995  | 995  | 995  | 995  |
| 0,4  | 171                                                | 454 | 720 | 1013 | 1008 | 1008 | 1008 | 1008 |
| 0,45 | 163                                                | 386 | 611 | 1024 | 1020 | 1020 | 1020 | 1020 |
| 0,5  | 155                                                | 314 | 461 | 937  | 1031 | 1031 | 1031 | 1031 |
| 0,6  | 139                                                | 285 | 454 | 807  | 1050 | 1050 | 1050 | 1050 |
| 0,65 | 131                                                | 269 | 396 | 732  | 1058 | 1058 | 1058 | 1058 |
| 0,7  | 122                                                | 253 | 336 | 651  | 996  | 1066 | 1066 | 1066 |
| 0,8  | 106                                                | 219 | 306 | 598  | 920  | 1081 | 1081 | 1081 |
| 0,9  | 89                                                 | 186 | 275 | 539  | 833  | 1005 | 1092 | 1092 |
| 1    | 70                                                 | 151 | 245 | 479  | 735  | 953  | 1102 | 1102 |
| 1,1  | 47                                                 | 113 | 214 | 417  | 659  | 897  | 1111 | 1111 |
| 1,2  | 44                                                 | 73  | 185 | 352  | 612  | 836  | 1119 | 1119 |
| 1,3  | 42                                                 | 70  | 151 | 328  | 564  | 769  | 1077 | 1126 |
| 1,4  | 40                                                 | 66  | 117 | 304  | 516  | 695  | 1058 | 1132 |
| 1,5  | 39                                                 | 62  | 81  | 281  | 466  | 657  | 1038 | 1138 |
| 1,6  | 37                                                 | 59  | 78  | 257  | 415  | 618  | 1004 | 1143 |
| 1,7  | 36                                                 | 56  | 74  | 234  | 363  | 577  | 969  | 1105 |
| 1,8  | 35                                                 | 53  | 71  | 210  | 347  | 537  | 932  | 1090 |
| 1,9  | 34                                                 | 51  | 68  | 187  | 331  | 496  | 893  | 1074 |
| 2    | 33                                                 | 49  | 65  | 163  | 316  | 454  | 853  | 1058 |
| 2,2  | 31                                                 | 46  | 59  | 112  | 287  | 368  | 774  | 1016 |
| 2,4  | 30                                                 | 43  | 55  | 83   | 260  | 337  | 695  | 971  |
| 2,6  | 29                                                 | 40  | 51  | 77   | 233  | 307  | 611  | 923  |
| 2,8  | 28                                                 | 38  | 48  | 71   | 206  | 279  | 524  | 873  |
| 3    | 27                                                 | 37  | 45  | 67   | 180  | 252  | 434  | 820  |
| 3,2  |                                                    | 35  | 43  | 62   | 153  | 224  | 373  | 769  |
| 3,4  |                                                    | 34  | 41  | 59   | 124  | 198  | 347  | 714  |
| 2,6  |                                                    | 33  | 40  | 55   | 94   | 171  | 323  | 658  |
| 3,8  |                                                    | 32  | 38  | 53   | 77   | 143  | 302  | 599  |
| 4    |                                                    | 31  | 37  | 50   | 72   | 113  | 282  | 539  |
| 4,2  |                                                    |     | 36  | 48   | 68   | 84   | 262  | 478  |
| 4,4  |                                                    |     | 35  | 46   | 65   | 79   | 242  | 415  |
| 4,6  |                                                    |     | 34  | 45   | 62   | 75   | 222  | 368  |
| 4,8  |                                                    |     | 33  | 43   | 59   | 71   | 203  | 338  |
| 5    |                                                    |     | 32  | 42   | 56   | 68   | 185  | 309  |
| 5,2  |                                                    |     |     | 40   | 54   | 65   | 166  | 282  |
| 5,4  |                                                    |     |     | 39   | 52   | 62   | 146  | 254  |
| 5,6  |                                                    |     |     | 38   | 50   | 60   | 125  | 227  |
| 5,8  |                                                    |     |     | 37   | 48   | 57   | 104  | 199  |
| 6    |                                                    |     |     | 36   | 47   | 55   | 82   | 172  |

Таблица 2.8

| $t, \text{ч}$ | $A\sqrt{H}/A_t = 0,12 \text{ м}^{1/2} \text{ при}$ |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------|----------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|               | $q, \text{Мкал/м}^2$                               |      |      |      |      |      |      |      |
|               | 18                                                 | 36   | 54   | 90   | 135  | 180  | 270  | 260  |
|               | $q, \text{МДж/м}^2$                                |      |      |      |      |      |      |      |
|               | 75                                                 | 151  | 226  | 377  | 565  | 754  | 1130 | 1507 |
| 0,05          | 670                                                | 670  | 670  | 670  | 670  | 670  | 670  | 670  |
| 0,1           | 1027                                               | 1027 | 1027 | 1027 | 847  | 847  | 847  | 847  |
| 0,15          | 581                                                | 1033 | 1033 | 1033 | 933  | 933  | 933  | 933  |
| 0,2           | 465                                                | 951  | 1049 | 1049 | 1051 | 1051 | 1051 | 1051 |
| 0,25          | 333                                                | 799  | 1063 | 1063 | 1057 | 1057 | 1057 | 1057 |
| 0,3           | 186                                                | 620  | 981  | 1076 | 1071 | 1071 | 1071 | 1071 |
| 0,35          | 185                                                | 556  | 882  | 1088 | 1083 | 1083 | 1083 | 1083 |
| 0,4           | 176                                                | 480  | 774  | 1098 | 1094 | 1094 | 1094 | 1094 |
| 0,45          | 168                                                | 404  | 650  | 1107 | 1103 | 1103 | 1103 | 1103 |
| 0,5           | 159                                                | 324  | 593  | 1004 | 1112 | 1112 | 1112 | 1112 |
| 0,6           | 142                                                | 292  | 472  | 856  | 1127 | 1127 | 1127 | 1127 |
| 0,65          | 133                                                | 275  | 407  | 774  | 1133 | 1133 | 1133 | 1133 |
| 0,7           | 124                                                | 257  | 341  | 681  | 1061 | 1139 | 1139 | 1139 |
| 0,8           | 106                                                | 221  | 309  | 622  | 971  | 1150 | 1150 | 1150 |
| 0,9           | 88                                                 | 186  | 276  | 556  | 873  | 1062 | 1259 | 1159 |
| 1             | 67                                                 | 149  | 244  | 490  | 765  | 1001 | 1166 | 1166 |
| 1,1           | 41                                                 | 107  | 211  | 422  | 680  | 937  | 1173 | 1173 |
| 1,2           | 39                                                 | 63   | 178  | 351  | 628  | 868  | 1178 | 1178 |
| 1,3           | 37                                                 | 60   | 145  | 327  | 575  | 794  | 1128 | 1183 |
| 1,4           | 36                                                 | 56   | 108  | 301  | 523  | 713  | 1106 | 1188 |
| 1,5           | 34                                                 | 53   | 69   | 277  | 469  | 672  | 1082 | 1192 |
| 1,6           | 33                                                 | 50   | 67   | 253  | 414  | 629  | 1043 | 1195 |
| 1,7           | 32                                                 | 47   | 63   | 228  | 358  | 585  | 1003 | 1151 |
| 1,8           | 31                                                 | 45   | 60   | 203  | 343  | 542  | 962  | 1133 |
| 1,9           | 30                                                 | 43   | 57   | 180  | 327  | 497  | 919  | 1114 |
| 2             | 29                                                 | 42   | 54   | 155  | 311  | 452  | 874  | 1096 |
| 2,2           |                                                    | 39   | 49   | 100  | 283  | 361  | 789  | 1048 |
| 2,4           |                                                    | 37   | 46   | 70   | 255  | 330  | 704  | 998  |
| 2,6           |                                                    | 35   | 43   | 64   | 227  | 300  | 613  | 946  |
| 2,8           |                                                    | 33   | 40   | 59   | 200  | 272  | 519  | 891  |
| 3             |                                                    | 32   | 38   | 54   | 173  | 245  | 423  | 834  |
| 3,2           |                                                    |      | 37   | 51   | 144  | 216  | 361  | 780  |
| 3,4           |                                                    |      | 35   | 48   | 113  | 190  | 336  | 721  |
| 3,6           |                                                    |      | 34   | 46   | 83   | 162  | 313  | 660  |
| 3,8           |                                                    |      | 33   | 43   | 64   | 132  | 293  | 598  |
| 4             |                                                    |      | 32   | 42   | 59   | 102  | 273  | 534  |
| 4,2           |                                                    |      |      | 40   | 55   | 69   | 253  | 469  |
| 4,4           |                                                    |      |      | 39   | 52   | 65   | 233  | 403  |
| 4,6           |                                                    |      |      | 37   | 50   | 61   | 213  | 355  |
| 4,8           |                                                    |      |      | 36   | 48   | 58   | 194  | 325  |
| 5             |                                                    |      |      | 35   | 46   | 55   | 175  | 297  |
| 5,2           |                                                    |      |      | 34   | 44   | 52   | 144  | 269  |
| 5,4           |                                                    |      |      | 33   | 42   | 50   | 134  | 241  |
| 5,6           |                                                    |      |      | 33   | 41   | 48   | 112  | 213  |
| 5,8           |                                                    |      |      | 32   | 40   | 46   | 91   | 186  |
| 6             |                                                    |      |      | 31   | 38   | 45   | 57   | 158  |

Таблица 2.9

| t, ч | $A\sqrt{H}/A_t = 0,3 \text{ м}^{1/2} \text{ при}$ |      |      |      |      |      |      |      |
|------|---------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|      | q, Мкал/м²                                        |      |      |      |      |      |      |      |
|      | 45                                                | 90   | 135  | 225  | 338  | 450  | 675  | 900  |
|      | q, МДж/м²                                         |      |      |      |      |      |      |      |
|      | 188                                               | 377  | 565  | 942  | 1413 | 1884 | 2826 | 3768 |
| 0,05 | 774                                               | 774  | 774  | 774  | 774  | 774  | 774  | 774  |
| 0,1  | 1193                                              | 1193 | 1193 | 1193 | 970  | 970  | 970  | 970  |
| 0,15 | 666                                               | 1187 | 1187 | 1187 | 1068 | 1068 | 1068 | 1068 |
| 0,2  | 515                                               | 1079 | 1196 | 1196 | 1205 | 1205 | 1205 | 1205 |
| 0,25 | 357                                               | 894  | 1204 | 1204 | 1204 | 1201 | 1201 | 1201 |
| 0,3  | 189                                               | 684  | 1098 | 1211 | 1208 | 1208 | 1208 | 1208 |
| 0,35 | 188                                               | 603  | 976  | 1216 | 1214 | 1214 | 1214 | 1214 |
| 0,4  | 187                                               | 513  | 846  | 1222 | 1220 | 1220 | 1220 | 1220 |
| 0,45 | 170                                               | 423  | 701  | 1226 | 1224 | 1224 | 1224 | 1224 |
| 0,5  | 161                                               | 330  | 633  | 1099 | 1229 | 1229 | 1229 | 1229 |
| 0,6  | 142                                               | 295  | 488  | 919  | 1236 | 1236 | 1236 | 1236 |
| 0,65 | 133                                               | 277  | 414  | 821  | 1239 | 1239 | 1239 | 1239 |
| 0,7  | 123                                               | 258  | 338  | 715  | 1148 | 1242 | 1242 | 1242 |
| 0,8  | 104                                               | 219  | 306  | 646  | 1039 | 1247 | 1247 | 1247 |
| 0,9  | 84                                                | 181  | 273  | 570  | 922  | 1136 | 1251 | 1251 |
| 1    | 60                                                | 140  | 238  | 495  | 796  | 1063 | 1254 | 1254 |
| 1,1  | 30                                                | 95   | 203  | 419  | 700  | 986  | 1257 | 1257 |
| 1,2  |                                                   | 41   | 169  | 341  | 641  | 905  | 1259 | 1259 |
| 1,3  |                                                   | 39   | 132  | 317  | 582  | 820  | 1195 | 1267 |
| 1,4  |                                                   | 37   | 93   | 292  | 524  | 728  | 1167 | 1263 |
| 1,5  |                                                   | 35   | 45   | 268  | 464  | 684  | 1138 | 1264 |
| 1,6  |                                                   | 33   | 42   | 242  | 404  | 636  | 1092 | 1266 |
| 1,7  |                                                   | 32   | 40   | 217  | 344  | 588  | 1046 | 1211 |
| 1,8  |                                                   | 31   | 38   | 191  | 330  | 540  | 998  | 1188 |
| 1,9  |                                                   | 30   | 36   | 166  | 315  | 492  | 949  | 1166 |
| 2    |                                                   |      | 35   | 139  | 301  | 443  | 898  | 1144 |
| 2,2  |                                                   |      |      | 81   | 273  | 345  | 804  | 1089 |
| 2,4  |                                                   |      |      | 43   | 245  | 316  | 709  | 1032 |
| 2,6  |                                                   |      |      | 39   | 216  | 288  | 609  | 973  |
| 2,8  |                                                   |      |      | 36   | 189  | 261  | 507  | 912  |
| 3    |                                                   |      |      | 34   | 161  | 232  | 402  | 849  |
| 3,2  |                                                   |      |      |      | 130  | 204  | 340  | 790  |
| 3,4  |                                                   |      |      |      | 99   | 177  | 318  | 726  |
| 3,6  |                                                   |      |      |      | 63   | 147  | 298  | 660  |
| 3,8  |                                                   |      |      |      | 39   | 115  | 278  | 591  |
| 4    |                                                   |      |      |      | 36   | 83   | 259  | 523  |
| 4,2  |                                                   |      |      |      | 35   | 42   | 239  | 454  |
| 4,4  |                                                   |      |      |      |      | 39   | 219  | 383  |
| 4,6  |                                                   |      |      |      |      | 37   | 200  | 334  |
| 4,8  |                                                   |      |      |      |      | 35   | 181  | 305  |
| 5    |                                                   |      |      |      |      | 34   | 161  | 278  |
| 5,2  |                                                   |      |      |      |      | 33   | 140  | 251  |
| 5,4  |                                                   |      |      |      |      | 32   | 118  | 222  |
| 5,6  |                                                   |      |      |      |      | 31   | 96   | 194  |
| 5,8  |                                                   |      |      |      |      |      | 72   | 166  |
| 6    |                                                   |      |      |      |      |      | 41   | 136  |

Пользование этими таблицами затруднено, так как природа материала стен рассматриваемого помещения часто отличается от природы материала стен эталонного помещения и, кроме того, часто приходится рассматривать горизонтальные проемы, для которых фактор проемности теряет свой смысл. Указанные трудности можно частично преодолеть следующим образом [2.8].

Для учета природы материала ограждений вводят поправочный коэффициент  $f_1$  к пожарной нагрузке и коэффициенту проемности. В табл. 2.10 коэффициент  $f_1$  приведен для семи типов ограждений.

Если в рассматриваемом помещении имеются горизонтальные проемы, то коэффициент проемности в данном случае представляет собой произведение аналогичного коэффициента для вертикальных проемов на коэффициент  $f_2$ , определяемый по табл. 2.11, где  $A_H$  и  $A_V$  — сум-

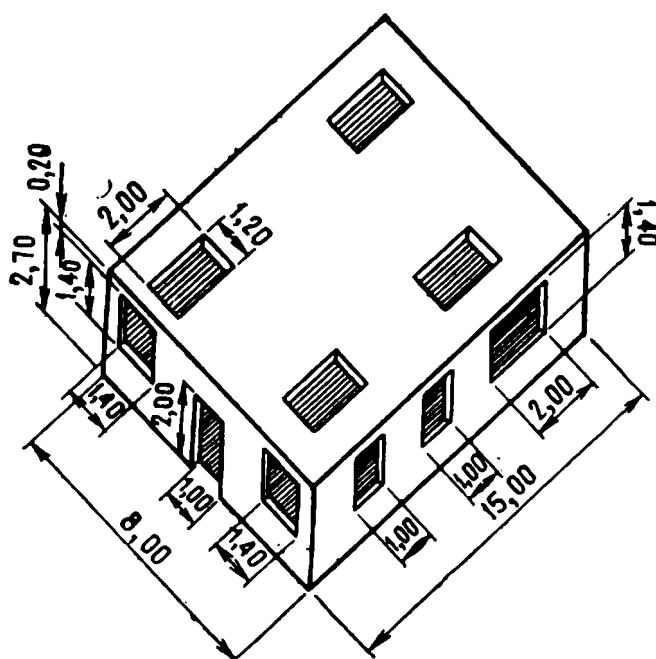


РИС. 2.4

Таблица 2.10

| Материал ограждений                                                                                                                         | Значения $f_1$ при $AV\bar{H}/A_f$ , равном |       |         |         |         |         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------|---------|---------|---------|---------|
|                                                                                                                                             | 0,02                                        | 0,04  | 0,06    | 0,08    | 0,1     | 0,12    |
| Эталонное помещение                                                                                                                         | 1                                           | 1     | 1       | 1       | 1       | 1       |
| Обычный бетон                                                                                                                               | 0,85                                        | 0,85  | 0,85    | 0,85    | 0,85    | 0,85    |
| Легкий бетон                                                                                                                                | 3                                           | 3     | 3       | 3       | 3       | 2,5     |
| Обычный бетон (50%) и легкий бетон (50%)                                                                                                    | 1,35                                        | 1,35  | 1,35    | 1,5     | 1,55    | 1,65    |
| Обычный бетон (33%), легкий бетон (50%) и три слоя изнутри наружу (17%): гипсовая плитка (13 мм), минеральная вата (100 мм), кирпич (20 см) | 1,65                                        | 1,5   | 1,35    | 1,5     | 1,75    | 2       |
| Незащищенный стальной лист (80%) и бетон (20%)*                                                                                             | 1—0,5                                       | 1—0,5 | 0,8—0,5 | 0,7—0,5 | 0,7—0,5 | 0,7—0,5 |
| Бетон (20%) и двухслойная гипсовая панель (гипс 2×13 мм) с воздушной прослойкой 100 мм (80%)                                                | 1,5                                         | 1,45  | 1,35    | 1,25    | 1,15    | 1,05    |
| Стальной лист — минеральная вата (100 мм) — стальной лист                                                                                   | 3                                           | 3     | 3       | 3       | 3       | 2,5     |

\* Большие значения  $f_1$  соответствуют пожарным нагрузкам не более 15 Мкал/м<sup>2</sup>, меньшие — нагрузкам, превышающим 120 Мкал/м<sup>2</sup>. Промежуточные значения определяются по интерполяции.

Таблица 2.11

| $\frac{A_H \sqrt{H_1}}{A_V \sqrt{H}}$ | $f_2$ | $\frac{A_H \sqrt{H_1}}{A_V \sqrt{H}}$ | $f_2$ |
|---------------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|
| 0                                     | 1     | 1                                     | 3,2   |
| 0,5                                   | 2,1   | 1,5                                   | 4,6   |

марные площади соответственно горизонтальных и вертикальных проемов, а  $H_1$  — средневзвешенное расстояние от плоскости горизонтальных проемов до середины вертикальных проемов.

*Пример.* Стенки помещения выполнены из легкого бетона объемной массой  $500 \text{ кг/м}^3$  (20%) и обычного бетона (80%). Пожарная нагрузка помещения составляет  $25 \text{ Мкал/м}^2$ . Определить максимальную температуру пожара в этом помещении, геометрические размеры которого приведены на рис. 2.4.

Площадь горизонтальных и вертикальных проемов соответственно составляет:  $A_H = 4 \cdot 1,2 \cdot 2 = 9,6 \text{ м}^2$ ;  $A_V = 1 \cdot 2 + 1,4 \cdot 1,4 \cdot 2 + 1 \cdot 1,4 \cdot 2 + 1 \cdot 2 = 11,52 \text{ м}^2$ , а полная поверхность ограждений  $A_t = 2(8 \cdot 1,5 + 8 \cdot 2,7 + 15 \cdot 2,7) = 364 \text{ м}^2$ .

Средняя высота вертикальных проемов равна  $H = (1,4 \cdot 9,52 + 2 \cdot 2) / 11,52 = 1,5 \text{ м}$ , откуда коэффициент проемности для вертикальных проемов составляет  $(A_V \sqrt{H}) / A_t = 0,039 \text{ м}^{1/2}$ ;  $(A_H \sqrt{H_1}) / (A_V \sqrt{H}) = (9,6 \sqrt{0,9}) / (11,52 \sqrt{1,5}) = 0,645 \Rightarrow f_2 = 2,45$ .

Коэффициент  $f_1$  можно получить из рассмотрения коэффициентов для помещений, стены которых выполнены либо из обычного, либо из легкого бетона:  $f_1 = 0,85 + 0,8(3 - 0,85) = 2,57$ .

Таким образом, получаем расчетные значения пожарной нагрузки и коэффициента проемности:  $q' = f_1 \cdot q = 2,57 \cdot 25 = 64,25 \text{ Мкал/м}^2$ ;  $[(A \sqrt{H}) / A_t] = f_1 f_2 (A \sqrt{H}) / A_t = 2,57 \cdot 2,45 \cdot 0,039 = 0,25 \text{ м}^{1/2}$ .

Максимальную температуру определяют из таблиц для эталонного помещения путем двойной интерполяции по коэффициенту проемности и пожарной нагрузке. В данном случае максимальная температура составляет  $1160^\circ \text{C}$ .

**2.4.2. Частный случай: гаражи.** Непрерывно обостряющаяся проблема паркования автомобилей обусловила резкое увеличение объема строительства различных автомобильных стоянок, в том числе подземных гаражей. На первый взгляд такие здания могут показаться весьма опасными с пожарной точки зрения, принимая во внимание пожарную нагрузку, которую представляет собой горючее в баках автомобилей. В действительности в предположении, что в баке содержится 75 л горючего, т. е. 60 кг, пожарная нагрузка на  $1 \text{ м}^2$  площади стоянки составляет лишь  $(60 \cdot 11) : 18 = 36,67 \text{ Мкал/м}^2 \approx 9 \text{ кг}$  условного дерева на  $1 \text{ м}^2$ , если считать, что каждый автомобиль занимает площадь  $18 \text{ м}^2$ .

Кроме того, многочисленные пожарные испытания были проведены на открытых стоянках [2.9, 2.10]. Они подтверждают выводы, сделанные во время пожаров, происходящих на реальных объектах [2.11], в том числе следующие:

опасность для людей весьма незначительна (не зарегистрировано ни одного несчастного случая на 1700 проанализированных пожаров); пожар обычно является не очень сильным и не распространяется на соседние автомобили;

выделяемые при пожаре тепло и дым не столь значительны, чтобы воспрепятствовать эвакуации людей из здания и вмешательству спасательных служб;

температура (не более 300 °С) при пожаре не является опасной для несущих конструкций стоянки (стальных или железобетонных).

## **2.5. ОЦЕНКА ТЕПЛОВОГО ПОТЕНЦИАЛА ДВИЖИМОГО И НЕДВИЖИМОГО ИМУЩЕСТВА**

Таким образом, моделирование естественного пожара возможно, если известен тепловой потенциал помещения, выраженный в ккал или через тепловой эквивалент дерева. Мы различаем: тепловой потенциал недвижимого имущества, включающий собственно конструкции, эксплуатируемое стационарное оборудование и отделочные материалы, и тепловой потенциал движимого имущества, к которому относятся все находящиеся в помещении предметы, местоположение которых может быть легко изменено.

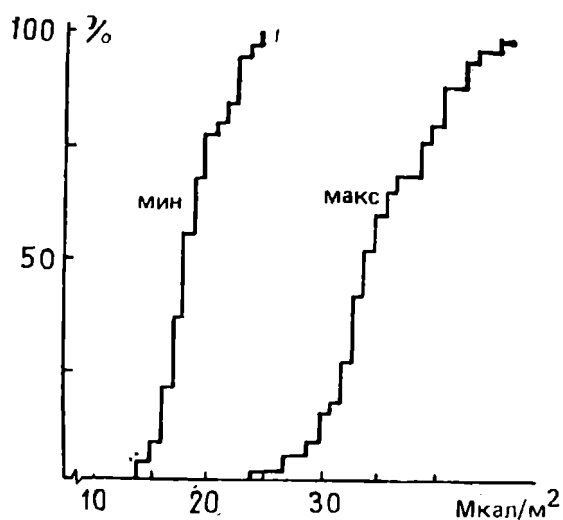
Тепловой потенциал недвижимого и движимого имущества определяется двумя способами в зависимости от того, насколько в рассматриваемом частном случае известна природа материалов, из которых выполнены элементы конструкций, а также их капитальность (размеры, сечения и т. п.). Мы различаем эти два подхода, называя их соответственно детерминистическим и статистическим.

**2.5.1. Детерминистическая оценка.** Весьма трудно оценить истинную теплотворную способность того или иного элемента или изделия, относящегося к движимому или недвижимому имуществу. Поэтому с целью измерения количества тепла, выделяемого при сгорании того или иного элемента, следует прибегать к экспериментам, проводимым в условиях, максимально приближенных к условиям естественного пожара. Заметим также, что для сведения потребителя было бы полезно, если бы фирма-изготовитель давала такую информацию, а также данные о характере и объеме образующихся при горении газов. В настоящее время можно опираться лишь на грубую оценку, основанную на теплотворной способности материалов, и на еще менее достоверные данные о тепловом потенциале наиболее распространенных материалов и изделий.

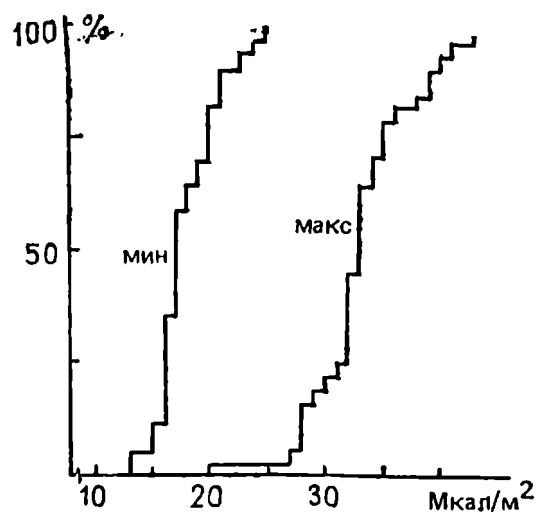
**2.5.1.1. Теплотворная способность материалов.** Мы советуем пользоваться данными Гретенера [2.12], которые широко применяются во многих странах [2.13] и относятся в основном к производственным и складским помещениям.

**2.5.1.2. Оценку теплового потенциала оборудования жилых и конторских зданий, а также гостиниц можно производить по данным табл. 1—5 [2.13], расположенным в конце данной главы.**

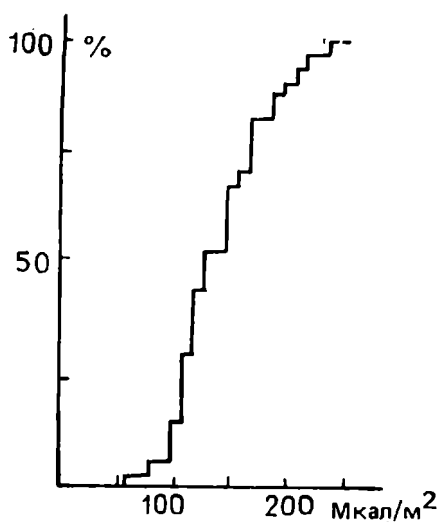
**2.5.2. Статистическая оценка.** Приведенная выше оценка теплового потенциала требует точных сведений, касающихся всех предме-



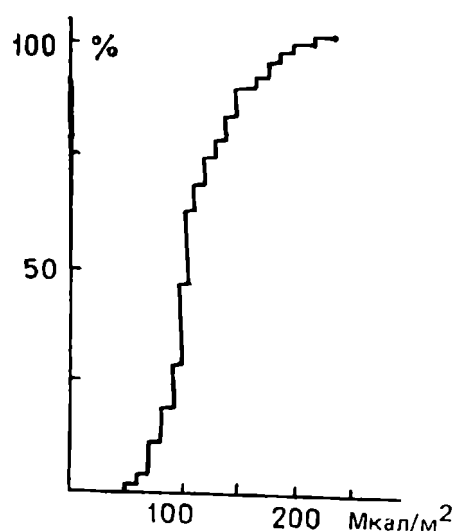
**РИС. 2.5. КВАРТИРЫ ИЗ ДВУХ КОМНАТ**



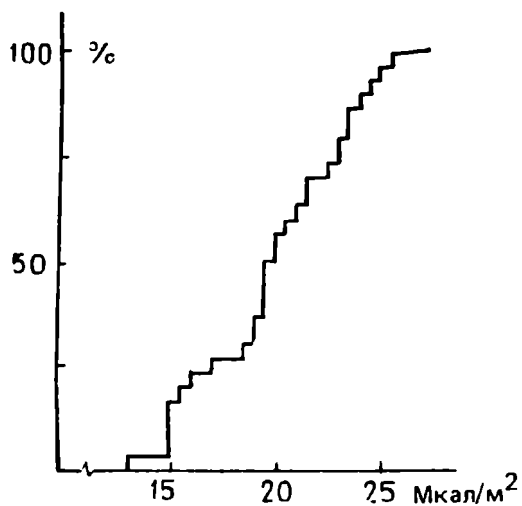
**РИС. 2.6. КВАРТИРЫ ИЗ ТРЕХ КОМНАТ**



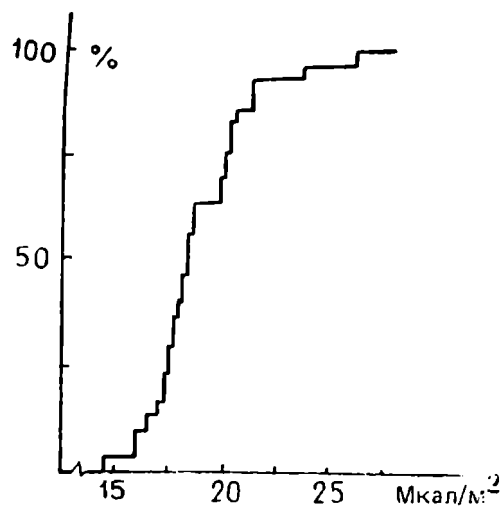
**РИС. 2.7. ТЕХНИЧЕСКИЕ И КОНТОРСКИЕ ПОМЕЩЕНИЯ**



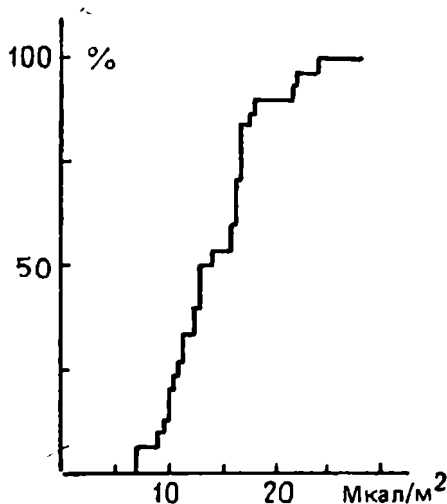
**РИС. 2.8. ТОРГОВЫЕ ПОМЕЩЕНИЯ**



**РИС. 2.9. ЯСЛИ, ДЕТСКИЕ САДЫ И НАЧАЛЬНЫЕ ШКОЛЫ**



**РИС. 2.10. СРЕДНИЕ УЧЕБНЫЕ ЗАВЕДЕНИЯ**



2.11. ВЫСШИЕ УЧЕБНЫЕ ЗАВЕ-  
ДЕНИЯ

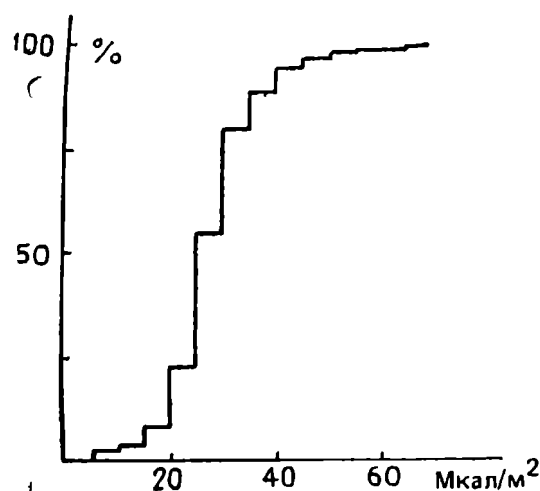


РИС. 2.12. ЛЕЧЕБНЫЕ УЧРЕЖДЕ-  
НИЯ (БОЛЬНИЦЫ)

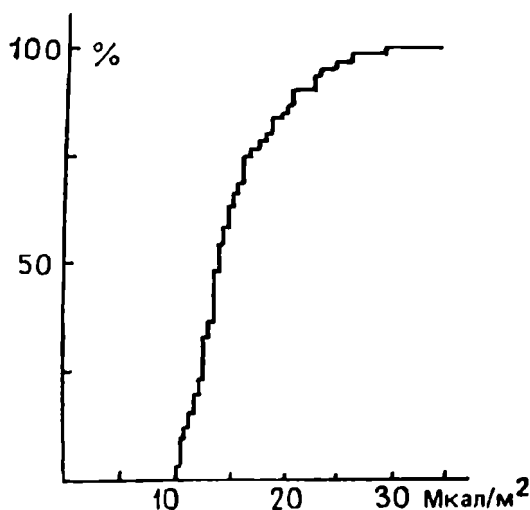


РИС. 2.13. ГОСТИНИЦЫ

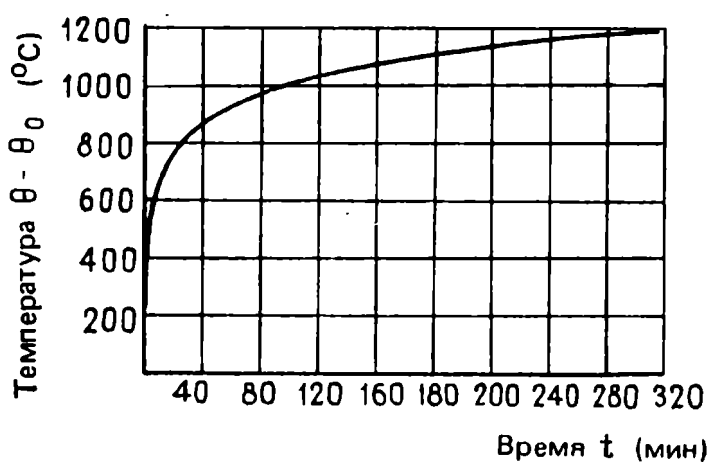


РИС. 2.14

тов движимого имущества, находящихся в помещении, поэтому мы называем ее детерминистической. Как правило, лишь в весьма редких случаях, когда встает вопрос об обеспечении пожарной безопасности, проектировщик уже обладает этими сведениями. С другой стороны, ему почти всегда известно назначение данного помещения. В связи с этим он может опираться на статистические данные, которые обычно имеются в виде гистограмм распределения и накопительных гистограмм, дающих сведения одновременно об изменчивости теплового потенциала в зависимости от назначения помещения и о статистической изменчивости этого параметра в помещениях одного и того же назначения.

Чтобы не перегружать читателя многочисленными данными, которыми мы располагаем и которые к тому же не всегда совпадают, мы ограничимся весьма исчерпывающим перечнем [2.12] (см. табл. 6—10 в приложении к гл. 2, данные которых относятся к 1 м высоты складирования, включая проходы) и несколькими гистограммами [2.13] (рис. 2.5—2.13).

## 2.6. СТАНДАРТНЫЙ ПОЖАР

Имеющиеся у нас сведения о пожаре еще весьма недостаточны, и во многих случаях не представляется возможным даже в первом приближении определить температуру в очаге пожара. Поэтому, согласно

Таблица 2.12

| Время $t$ , мин | Разность температур $\theta - \theta_0$ , °C | Время $t$ , мин | Разность температур $\theta - \theta_0$ , °C |
|-----------------|----------------------------------------------|-----------------|----------------------------------------------|
| 5               | 556                                          | 90              | 986                                          |
| 10              | 659                                          | 120             | 1029                                         |
| 15              | 718                                          | 180             | 1090                                         |
| 30              | 821                                          | 240             | 1133                                         |
| 60              | 925                                          | 360             | 1193                                         |

постановлению от 5 января 1959 г., до сих пор используется условная кривая температура— время, не зависящая от помещения и пожарной нагрузки и представляющая собой непрерывно возрастающую логарифмическую функцию времени:

$$\theta - \theta_0 = 345 \lg (8t + 1),$$

где  $t$  — время, мин;  $\theta$  — температура, °C;  $\theta_0$  — начальная температура, °C.

Достоинством этой кривой, принятой в международном масштабе стандартом № 834 Международной организации по стандартизации (ИСО), является лишь ее условный характер. Она никоим образом не отражает повышения температуры реального пожара, которое, как мы видели, может быть очень резким, но столь же быстро и уменьшается по достижении максимальной температуры.

*Приложение. ОЦЕНКА ТЕПЛОВОГО ПОТЕНЦИАЛА ИМУЩЕСТВА  
ЖИЛЫХ И КОНТОРСКИХ ЗДАНИЙ, ГОСТИНИЦ,  
СКЛАДСКИХ И КОНТОРСКИХ ПОМЕЩЕНИЙ,  
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ, ТОРГОВЫХ  
И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ*

Таблица 1. Кухня

| Оборудование                                  |                                      | МДж          |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------|--------------|
| Деревянная мебель                             | Стол кухонный                        | 340          |
|                                               | Табуретка                            | 170          |
|                                               | Стул                                 | 250          |
| Смешанная мебель                              | Стул (с металлическими ножками)      | 60           |
|                                               | Стол (с металлическими ножками)      | 250          |
|                                               | Табуретка (с металлическими ножками) | 40           |
| Стационарная мебель (включая со-<br>держимое) | Шкаф для посуды                      | 1200         |
|                                               | Шкаф низкий (для продуктов)          | 420          |
|                                               | Цоколь раковины (мойки)              | 90           |
|                                               | Низкие элементы                      | 220 (на 1 м) |
|                                               | Высокие элементы                     | 350 (на 1 м) |

Таблица 2. Гостиная и столовая

| Оборудование                                 | МДж       | Оборудование                      | МДж  |
|----------------------------------------------|-----------|-----------------------------------|------|
| Шкаф общего назначения (посуда, белье и пр.) | 1500—2000 | Диван                             | 840  |
| Шкаф книжный (на 1 м полок)                  | 840       | Стул жесткий                      | 70   |
| Малая мебель                                 | 250       | Стул мягкий                       | 250  |
| Столик круглый                               | 100       | Стол письменный двух-тумбовый     | 2200 |
| Столик низкий                                | 170       | То же, однотумбовый               | 1200 |
| Стол обеденный средних размеров              | 420       | То же, металлический              | 840  |
| То же, большой раз-движной                   | 600       | То же, пустой                     | 330  |
| Кресло                                       | 330       | Шкаф платяной (пустой)            | 500  |
|                                              |           | Пианино                           | 2800 |
|                                              |           | Радиоприемник со стереоприставкой | 110  |
|                                              |           | Телевизор                         | 150  |

Таблица 3. Спальня

| Оборудование         | МДж  | Оборудование                             | МДж  |
|----------------------|------|------------------------------------------|------|
| Кровать обыкновенная | 1100 | Шкаф платяной двух-створчатый            | 1680 |
| Кровать деревянная   | 1600 | Шкаф платяной трех-или четырехстворчатый | 2500 |
| Белье                | 450  | Комод                                    | 1000 |
| Матрац поролоновый   | 480  |                                          |      |
| Столик ночной        | 160  |                                          |      |

Таблица 4. Передняя и коридор

| Оборудование                                   | МДж  | Оборудование                                                          | МДж                              |
|------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Комод (с содержимым)                           | 1000 | Гардероб в коридоре (с содержимым)                                    | 850+300<br>(при наличии створок) |
| Шкаф встроенный одно-створчатый (с содержимым) | 700  | Паркет деревянный:<br>длина (м) × ширина (м) × толщина (м) × 83,6=... | МДж/м <sup>2</sup>               |
| То же, двухстворчатый (с содержимым)           | 1300 | Ковер или ковровое покрытие                                           | 50 »                             |
| То же, трехстворчатый (с содержимым)           | 2000 | Занавески оконные                                                     | 10 »                             |
| То же, четырехстворчатый (с содержимым)        | 2700 | Занавески оконные двойные                                             | 50 »                             |

**Пример 1.** Расчет теплового потенциала двухкомнатной квартиры площадью 48 м<sup>2</sup>.

### К у х н я

|                                                 |         |
|-------------------------------------------------|---------|
| Стол с металлическими ножками . . . . .         | 250 МДж |
| Четыре стула . . . . .                          | 240 »   |
| Табуретка . . . . .                             | 40 »    |
| Элементы низкие (2,5 м) . . . . .               | 550 »   |
| Элементы высокие (2,5 м) . . . . .              | 870 »   |
| Цоколь раковины (мойки) . . . . .               | 90 »    |
| Занавески оконные (3 м <sup>2</sup> ) . . . . . | 30 »    |
| Радиоприемник . . . . .                         | 110 »   |

**Итого . . . . . 2180 МДж**

### С т о л о в а я - г о с т и н а я

|                                                  |          |
|--------------------------------------------------|----------|
| Шкаф общего назначения . . . . .                 | 2000 МДж |
| Малая мебель (2 шт.) . . . . .                   | 500 »    |
| Стол обеденный . . . . .                         | 420 »    |
| Шесть стульев . . . . .                          | 1500 »   |
| Два кресла . . . . .                             | 660 »    |
| Столик круглый . . . . .                         | 100 »    |
| Занавески оконные (15 м <sup>2</sup> ) . . . . . | 150 »    |
| Столик низкий (журнальный) . . . . .             | 170 »    |
| Стереоустановка . . . . .                        | 110 »    |

**Итого . . . . . 5610 МДж**

### С п а л ь н я

|                                                         |          |
|---------------------------------------------------------|----------|
| Кровать обычная . . . . .                               | 1100 МДж |
| Матрац поролоновый . . . . .                            | 480 »    |
| Два ночных столика . . . . .                            | 320 »    |
| Шкаф платяной четырехстворчатый . . . . .               | 2500 »   |
| Комод . . . . .                                         | 1000 »   |
| Занавески оконные (5 м <sup>2</sup> ) . . . . .         | 50 »     |
| Занавески оконные двойные (5 м <sup>2</sup> ) . . . . . | 250 »    |

**Итого . . . . . 5700 МДж**

### П е р е д н я я

|                                                  |         |
|--------------------------------------------------|---------|
| Полки книжные (1 м <sup>2</sup> полок) . . . . . | 840 МДж |
| Шкаф встроенный двустворчатый . . . . .          | 1300 »  |
| Гардероб . . . . .                               | 850 »   |

**Итого . . . . . 2990 МДж**

### Суммарный тепловой потенциал квартиры

|                                                  |          |
|--------------------------------------------------|----------|
| Кухня (7 м <sup>2</sup> ) . . . . .              | 2180 МДж |
| Столовая (18 м <sup>2</sup> ) . . . . .          | 5610 »   |
| Спальня (10 м <sup>2</sup> ) . . . . .           | 5700 »   |
| Передняя . . . . .                               | 2990 »   |
| Ковровое покрытие (30 м <sup>2</sup> ) . . . . . | 1500 »   |

**Итого . . . . . 17 980 МДж**

Отсюда  $q = 17\,980/48 = 375$  МДж/м<sup>2</sup>.

Таблица 5. Конторское здание

| Оборудование                         | МДж | Оборудование                                                            | МДж  |
|--------------------------------------|-----|-------------------------------------------------------------------------|------|
| Стул (с металлическими ножками)      | 60  | Стул мягкий конторский                                                  | 200  |
| Стол (с металлическими ножками)      | 250 | Стол деревянный двухтумбовый                                            | 2200 |
| Табуретка (с металлическими ножками) | 40  | То же, однотумбовый                                                     | 1200 |
| Кресло конторское                    | 250 | Стол металлический                                                      | 900  |
|                                      |     | Полки книжные (содержимое на 1 м <sup>2</sup> горизонтальных стеллажей) | 840  |

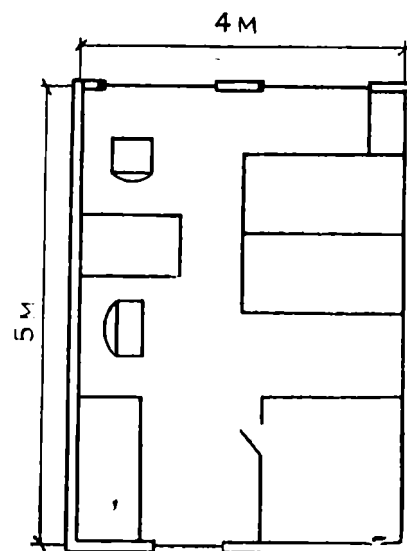
*Пример 2.* Расчет теплового потенциала десяти конторских помещений площадью 15 м<sup>2</sup> каждое (при типичной обстановке конторского помещения).

|                                                                |                 |
|----------------------------------------------------------------|-----------------|
| Стол двухтумбовый . . . . .                                    | 2200 МДж        |
| Стол обычный . . . . .                                         | 420 »           |
| Два кресла . . . . .                                           | 660 »           |
| Стул мягкий . . . . .                                          | 250 »           |
| Шкаф книжный (5 м <sup>2</sup> горизонтальных полок) . . . . . | 4200 »          |
| <b>Итого . . . . .</b>                                         | <b>7730 МДж</b> |

Отсюда  $q = (7730 \cdot 10) / (15 \cdot 1,3 \cdot 10) = 396 \text{ МДж/м}^2$ .

Здесь расчет пожарной нагрузки произведен для всего комплекса помещений, т. е. с учетом площади примыкающих коридоров (30% общей площади комнат).

*Пример 3.* Расчет теплового потенциала гостиничного номера площадью 20 м<sup>2</sup> (определяется по данным для спальни обычной квартиры).



|                                                   |                 |
|---------------------------------------------------|-----------------|
| Стол письменный (пустой) . . . . .                | 330 МДж         |
| Два стула . . . . .                               | 500 »           |
| Гардероб двустворчатый . . . . .                  | 1680 »          |
| Кровать обычная . . . . .                         | 1100 »          |
| Белье постельное . . . . .                        | 450 »           |
| Ковер . . . . .                                   | 800 »           |
| Бумаги и т. п. . . . .                            | 200 »           |
| Занавески оконные (в том числе двойные) . . . . . | 550 »           |
| <b>Итого . . . . .</b>                            | <b>5670 МДж</b> |

Отсюда  $q = 5610 / 20 = 280 \text{ МДж/м}^2$ .

Таблица 6. Складские помещения

| Складируемые материалы                           | Мкал/м <sup>3</sup> | Складируемые материалы                             | Мкал/м <sup>3</sup> |
|--------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------|---------------------|
| Аккумуляторы                                     | 200                 | Изделия табачные (сигареты и пр.)                  | 600                 |
| Продукты продовольственные                       | 200                 | Материалы для чистки обуви                         | 700                 |
| Спички                                           | 200                 | Воск                                               | 800                 |
| Приборы электронные                              | 40                  | Изделия из воска                                   | 500                 |
| Приборы бытовые                                  | 50                  | Воск для натирки полов                             | 1200                |
| Документация (архивная)                          | 400                 | Цемент                                             | 5                   |
| Холодильники бытовые                             | 80                  | Клси                                               | 800                 |
| Асфальт в бочках                                 | 800                 | Стружка деревянная                                 | 500                 |
| Части запасные к автомобилям                     | 40                  | Корзины плетеные                                   | 40                  |
| Банки аккумуляторные из синтетического материала | 200                 | Изделия канатные                                   | 150                 |
| Щетки, метлы и т. п.                             | 100                 | Изделия косметические                              | 120                 |
| Материалы перевязочные                           | 200                 | Хлопок в тюках                                     | 300                 |
| Масло сливочное                                  | 1000                | Краска полиграфическая в бочках                    | 800                 |
| Пиво в металлических бочках или цистернах        | 0                   | То же, в бидонах                                   | 400                 |
| Сухари, галеты, печенье                          | 200                 | Волос животный (конский)                           | 150                 |
| Катушки деревянные для кабеля                    | 120                 | Кожа                                               | 400                 |
| Фанера                                           | 1000                | Изделия кожаные                                    | 150                 |
| Дрова (для отопления, сжигания)                  | 800                 | Кожа искусственная                                 | 400                 |
| Лесоматериал неокоренный                         | 1500                | Изделия из искусственной кожи                      | 200                 |
| Изделия деревянные                               | 300                 | Оборудование полиграфическое (печатающие цилиндры) | 0                   |
| Бутыли и баллоны стеклянные                      | 200                 | Отходы древесные                                   | 60                  |
| Щетки (зубные, одежные и пр.)                    | 200                 | Отходы текстильные (тряпки, лоскуты и пр.)         | 800                 |
| Кабель (на деревянной катушке)                   | 150                 | Макулатура бумажная в тюках                        | 500                 |
| Кофе сырой (необжаренный)                        | 700                 | Отходы текстильные                                 | 200                 |
| Ящики деревянные                                 | 150                 | Декорации театральные и пр.                        | 250                 |
| Каучук сырой                                     | 6800                | Препараты и инструменты зубоветчебные              | 80                  |
| Резина пористая в блоках                         | 600                 | Изделия кружевные                                  | 150                 |
| То же, в рулонах                                 | 300                 | Товары аптекарские и москательные                  | 80                  |
| Изделия резиновые                                | 1200                | Удобрения искусственные                            | 40                  |
| Картон гудронированный (толь)                    | 500                 | Камеры холодильные с различными товарами           | 100                 |
| Картон листовой в штабелях                       | 1000                | То же, в магазинах                                 | 50                  |
| Изделия из картона                               | 100                 | Мука в мешках                                      | 2000                |
| Картон гофрированный                             | 300                 | Мука в силосованном виде                           | 3600                |
| Целлулоид                                        | 800                 | Рамы оконные деревянные                            | 80                  |
| Зерновые (в мешках)                              | 1600                | То же, из искусственного материала                 | 80                  |
| Зерновые (в силосованном виде)                   | 3200                | Изделия меховые                                    | 200                 |
| Пенька                                           | 300                 | Волокно кокосовое                                  | 300                 |
| Уголь                                            | 2500                | Волокна растительные                               | 250                 |
| Обувь                                            | 100                 | Изделия веревочные                                 | 250                 |
| Предметы ухода за обувью                         | 200                 | Шпагат упаковочный                                 | 250                 |
| Тряпье, лоскуты                                  | 200                 | Проволока металлическая изолированная              | 40                  |
| Шоколад                                          | 800                 |                                                    |                     |

| Складируемые материалы                   | Мкал/м <sup>3</sup> | Складируемые материалы                    | Мкал/м <sup>3</sup> |
|------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------|---------------------|
| Нить текстильная                         | 400                 | Нитроцеллюлоза влажная в бочках           | 250                 |
| Цветы искусственные                      | 40                  | Сажга газовая в мешках                    | 3000                |
| Хлопья картофельные                      | 400                 | Яйца                                      | 40                  |
| Сено в связках                           | 250                 | Вата                                      | 250                 |
| Формы для производства обуви             | 400                 | Инструменты различные                     | 25                  |
| Корма и фураж                            | 800                 | Солома                                    | 200                 |
| Одежда меховая                           | 300                 | Поддоны деревянные                        | 300                 |
| Сыр                                      | 600                 | Изделия писчебумажные                     | 200                 |
| Газ сжиженный в бутылках                 | 1500                | Бумага в пачках                           | 2000                |
| Гудрон                                   | 800                 | Изделия из бумаги                         | 250                 |
| Масла смазочные                          | 4500                | Бумага в рулонах (укладка по горизонтали) | 2400                |
| Жир пищевой                              | 4500                | То же (укладка по вертикали)              | 2400                |
| Семена                                   | 200                 | Изделия макаронные                        | 400                 |
| Хмель                                    | 400                 | Батареи сухие                             | 150                 |
| Масло пищевое в бочках                   | 4500                | Фанера                                    | 700                 |
| Масла различные в бочках                 | 4500                | Плиты древесные                           | 1600                |
| Продукция печатная на стеллажах          | 400                 | Перо (для подушек и перин)                | 60                  |
| То же, на поддонах                       | 2000                | Резина автомобильная                      | 440                 |
| Игрушки                                  | 200                 | Двери деревянные                          | 420                 |
| Джут                                     | 320                 | Двери из синтетического материала         | 1000                |
| Шерсть древесная                         | 300                 | Балки и перекрытия (полы) деревянные      | 1000                |
| Молоко-порошок                           | 2500                | Продукты пищевые                          | 200                 |
| Пробка и пробковые изделия               | 200                 | Продукты пищевые (сырье)                  | 800                 |
| Лен                                      | 300                 | Вещества химические основные              | 40                  |
| Белье                                    | 150                 | То же, смеси                              | 200                 |
| Принадлежности постельные                | 120                 | То же, лабораторные                       | 0                   |
| Книги                                    | 500                 | Предметы ухода за обувью                  | 500                 |
| Машины стиральные                        | 10                  | Реагенты для стирки (сырье)               | 120                 |
| Солод в силосованном виде                | 3200                | Порошки стиральные                        | 0                   |
| Мастики и замазка                        | 300                 | Радиоаппаратура                           | 50                  |
| Материалы строительные                   | 120                 | Емкости из синтетических материалов       | 170                 |
| Матрацы                                  | 200                 | Набивочный материал для мебели (поролон)  | 100                 |
| Оборудование и принадлежности конторские | 200                 | Смола синтетическая в бочках              | 1000                |
| Материал упаковочный                     | 240                 | То же, в плитках                          | 800                 |
| Электрооборудование                      | 80                  | Изделия из камыша и тростника             | 50                  |
| Материалы синтетические (сырье)          | 1400                | Покрытие полов из органических материалов | 1600                |
| То же, вспененные                        | 300                 | Мешки джутовые                            | 180                 |
| Изделия из синтетических материалов      | 200                 | Мешки из синтетических материалов         | 6000                |
| Медикаменты                              | 80                  | Мешки бумажные                            | 3000                |
| Патока в бочках                          | 1200                | Мыло                                      | 1000                |
| Мебель различная                         | 200                 |                                           |                     |
| Очки в футлярах или коробках             | 10                  |                                           |                     |
| Изделия из поролон                       | 180                 |                                           |                     |
| Поролон в рулонах                        | 220                 |                                           |                     |
| Нитраты (селитра)                        | 20                  |                                           |                     |

| Складируемые материалы       | Мкал/м <sup>3</sup> | Складируемые материалы                   | Мкал/м <sup>3</sup> |
|------------------------------|---------------------|------------------------------------------|---------------------|
| Лыжи                         | 400                 | Бочки из синтетического материала пустые | 200                 |
| Шелк искусственный           | 400                 | Электропроигрыватели                     | 50                  |
| Ткани шелковые               | 250                 | Ткани трикотажные и сетчатые             | 150                 |
| Растворители                 | 800                 | Изделия трикотажные                      | 300                 |
| Напитки спиртные (крепкие)   | 200                 | Лампы люминесцентные                     | 0                   |
| Сахар                        | 2000                | Черепица на деревянных поддонах          | 40                  |
| Сладости                     | 200                 | Черепица на металлических поддонах       | 0                   |
| Табак (сырье)                | 400                 | Лаки очищенные                           | 600                 |
| Изделия табачные             | 500                 | Лаки в бидонах                           | 400                 |
| Изделия ковровые             | 400                 | Лаки (сырье)                             | 600                 |
| Телевизоры                   | 50                  | Стекло оконное                           | 0                   |
| Изделия текстильные (тканые) | 250                 | Изделия из стекла                        | 0                   |
| Ткани                        | 400                 | Одежда                                   | 100                 |
| Клеенка                      | 300                 |                                          |                     |
| Полотно льняное              | 300                 |                                          |                     |
| Бочки деревянные пустые      | 200                 |                                          |                     |

Таблица 7. Производственные здания

| Назначение                                | Мкал/м <sup>3</sup> | Назначение                            | Мкал/м <sup>3</sup> |
|-------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|
| Скотобойня                                | 10                  | ной отделки (сиденья, обивка)         | 160                 |
| Производство аккумуляторов                | 100                 | Магазин запасных частей к автомобилям | 80                  |
| Отправка аккумуляторов                    | 180                 | Производство самолетов                | 40                  |
| Холодильник для ацетилена в бутылках      | 160                 | Сборочный цех авиационного завода     | 40                  |
| Производство кислот                       | 20                  | Производство брезента                 | 80                  |
| Производство спичек                       | 80                  | Производство щеток                    | 160                 |
| Отправка продовольственных продуктов      | 240                 | Производство весов                    | 80                  |
| Производство алюминия                     | 10                  | Чулочное производство                 | 600                 |
| Обработка алюминия                        | 40                  | Кораблестроительная верфь             | 150                 |
| Производство бытовых приборов             | 80                  | Производство сливочного масла         | 160                 |
| Производство электробытовых приборов      | 60                  | Производство мотоциклов               | 40                  |
| Производство сантехнического оборудования | 30                  | Пивоваренный завод                    | 20                  |
| Аппретирование тканей                     | 50                  | Бисквитная фабрика                    | 80                  |
| Аппретирование бумаги                     | 160                 | Изготовление битума                   | 200                 |
| Производство оружия                       | 60                  | Производство электрических обмоток    | 80                  |
| Производство автомобильных кузовов        | 40                  | Деревообработка                       | 160                 |
| Окраска автомобильных кузовов             | 130                 | Резьба по дереву                      | 160                 |
| Сборка автомобилей                        | 80                  | Пропитка дерева                       | 800                 |
| Ремонт автомобилей                        | 80                  | Сушка древесины                       | 200                 |
| Производство автомобильных кузовов        | 160                 | Производство безалкогольных напитков  | 20                  |
|                                           |                     | Производство картонных ящиков         | 200                 |

| Назначение                 | Мкал/м <sup>2</sup> | Назначение                 | Мкал/м <sup>2</sup> |
|----------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
| Производство конфет        | 100                 | Лакокрасочное производст-  | 1000                |
| Упаковка конфет            | 200                 | во                         |                     |
| Чулочно-вязальное произ-   | 120                 | Смешивание лаков и красок  | 400                 |
| водство                    |                     | Швейное производство       | 70                  |
| Свечное производство       | 320                 | Производство одеял         | 120                 |
| Хлебопекарное производст-  | 50                  | Кожевенное производство    | 100                 |
| во (печи)                  |                     | Производство кожаных из-   | 120                 |
| Кирпичное производство     | 0                   | делий                      |                     |
| Вышивальное производство   | 60                  | Производство искусственной | 240                 |
| Производство щеток         | 160                 | кожи                       |                     |
| Производство кабеля        | 80                  | Обработка искусственной    | 90                  |
| Изготовление ящиков        | 240                 | кожи и пошив изделий из    |                     |
| Производство резиновых     | 140                 | нее                        |                     |
| изделий                    |                     | Производство кухонных      | 40                  |
| Производство каучука       | 140                 | плит                       |                     |
| Кузовной цех               | 40                  | Обрезание слитков (метал-  | 80                  |
| Производство гудрониро-    | 400                 | лургия)                    |                     |
| ванного картона (толя)     |                     | Распиловка лесоматериала   | 160                 |
| Картонное производство     | 60                  | Резка искусственной кожи   | 60                  |
| Картонажная фабрика        | 200                 | Раскрой текстиля           | 120                 |
| Винные погреба             | 20                  | Винокуренный завод (горю-  | 40                  |
| Производство целлулоида    | 200                 | чие материалы)             |                     |
| Керамическое производство  | 40                  | То же (негорючие мате-     | 10                  |
| Производство шляп          | 120                 | риалы)                     |                     |
| Плотницкая мастерская      | 160                 | Золочение (по металлу)     | 20                  |
| Тележное производство      | 120                 | Производство сукна         | 60                  |
| Котельная (дрова или       | 60                  | Мебельная фабрика (без     | 120                 |
| уголь)                     |                     | склада материала)          |                     |
| Обувное производство       | 120                 | Предприятие электропро-    | 140                 |
| Отправка обуви             | 150                 | мышленности                |                     |
| Переработка какао          | 200                 | Производство электроаппа-  | 90                  |
| Производство шоколада      | 1400                | ратуры                     |                     |
| Упаковка шоколада          | 120                 | Ремонт электроаппаратуры   | 120                 |
| Производство сидра (вклю-  | 40                  | Производство электронной   | 90                  |
| чая склад тары)            |                     | аппаратуры                 |                     |
| Табачное производство      | 60                  | Ремонт электронной аппа-   | 120                 |
| Производство изделий из    | 20                  | ратуры                     |                     |
| цемента                    |                     | Производство железобетон-  | 25                  |
| Производство цемента       | 10                  | ных изделий                |                     |
| Производство воска для на- | 400                 | Намотка текстильной про-   | 140                 |
| тирки полов                |                     | дукции                     |                     |
| Производство изделий из    | 320                 | Упаковка негорючих мате-   | 100                 |
| воска                      |                     | риалов и изделий           |                     |
| Отправка воска             | 500                 | Упаковка пищевых продук-   | 200                 |
| Производство негоряемых    | 20                  | тов                        |                     |
| шкафов                     |                     | Упаковка печатной продук-  | 400                 |
| Производство клеев         | 300                 | ции                        |                     |
| Производство специй        | 10                  | Упаковка текстильных изде- | 150                 |
| Консервное производство    | 10                  | лий                        |                     |
| Производство фанеры        | 200                 | Упаковка различных горю-   | 150                 |
| Производство канатов       | 80                  | чих материалов             |                     |
| Производство косметиче-    | 80                  | Производство воска для по- | 400                 |
| ских изделий               |                     | лов                        |                     |
| Производство полиграфи-    | 160                 | Производство химических    | 40                  |
| ческих красок              |                     | удобрений                  |                     |

| Назначение                                      | Мкал/м³ | Назначение                            | Мкал/м³ |
|-------------------------------------------------|---------|---------------------------------------|---------|
| Штамповка металла                               | 30      | Сыроваренное производст-              | 30      |
| Штамповка изделий из искусственной кожи и т. п. | 100     | во                                    |         |
| Производство этикеток, ярлыков и пр.            | 60      | Гальванопластическое производство     | 50      |
| Отправка изделий из синтетических материалов    | 240     | Производство вафель                   | 80      |
| Отправка жестяных изделий                       | 40      | Производство и упаковка пищевого льда | 20      |
| Отправка изделий из стекла                      | 160     | Производство пищевых жиров            | 250     |
| Отправка напитков                               | 80      | Отправка пищевых жиров                | 220     |
| Отправка картонажных изделий                    | 150     | Изготовление офортов (на стекле)      | 40      |
| Отправка лакокрасочных изделий и мастик         | 300     | Приготовление гудрона (дегтя)         | 200     |
| Отправка печатной продукции                     | 400     | Часовое производство (сборка)         | 60      |
| Отправка мебели                                 | 150     | Часовое производство (заготовки)      | 10      |
| Отправка малых изделий из дерева                | 140     | Ремонт часов                          | 60      |
| Отправка пищевых продуктов                      | 240     | Производство пищевых масел            | 250     |
| Отправка текстильных изделий                    | 150     | Отправка пищевых масел                | 220     |
| Производство экстракта кофе                     | 80      | Маслозавод (ванны)                    | 300     |
| Производство деревянных оконных рам             | 240     | Типография                            | 80      |
| Производство остекления                         | 160     | Типография (обработка цилиндров)      | 60      |
| Жестяное производство                           | 40      | Химическая промышленность             | 80      |
| Металлургическое производство                   | 25      | Обработка информации                  | 100     |
| Производство искусственного волокна             | 80      | Производство оптических приборов      | 40      |
| Обработка искусственного волокна                | 80      | Производство игрушек (сгораемых)      | 120     |
| Прядильное производство (натуральный шелк)      | 80      | То же (несгораемых)                   | 40      |
| Прядильное производство (без прочесывания)      | 60      | Бактериологическая лаборатория        | 40      |
| Производство ниток                              | 60      | Химическая лаборатория                | 120     |
| Киностудия                                      | 80      | Электrolaboratory                     | 40      |
| Производство искусственных цветов               | 80      | Фотолаборатория                       | 80      |
| Производство хрустящего картофеля (хлопьев)     | 50      | Металлургическая лаборатория          | 40      |
| Производство чугуна                             | 20      | Физическая лаборатория                | 40      |
| Кузнечное производство                          | 20      | Зубоврачебная лаборатория             | 60      |
| Кормопроизводство                               | 400     | Производство сгущенного молока        | 40      |
| Меховое ателье                                  | 80      | Производство порошкового молока       | 40      |
| Обработка металла фрезерованием                 | 40      | Молочный завод                        | 40      |
| Холодильные камеры                              | 400     | Производство ламп накаливания         | 10      |
| Производство бытовых холодильников              | 240     | Обработка пробки                      | 120     |
|                                                 |         | Производство белья                    | 160     |
|                                                 |         | Производство ликера                   | 100     |

| Назначение                                       | Мкал/м <sup>2</sup> | Назначение                                        | Мкал/м <sup>2</sup> |
|--------------------------------------------------|---------------------|---------------------------------------------------|---------------------|
| Производство постельных принадлежностей          | 130                 | Сборка мотоциклов                                 | 80                  |
| Стенд для испытаний электроаппаратуры            | 40                  | Приготовление вспененных синтетических материалов | 600                 |
| Стенд для испытаний машин                        | 20                  | Химическая чистка                                 | 60                  |
| Стенд для испытания текстильных изделий          | 60                  | Ювелирная мастерская                              | 40                  |
| Свалка различных отходов                         | 120                 | Ювелирное производство                            | 40                  |
| Производство пишущих машин                       | 70                  | Производство ваты                                 | 60                  |
| Производство швейных машин                       | 60                  | Производство инструмента                          | 40                  |
| Производство стиральных машин                    | 60                  | Производство перевязочных материалов              | 100                 |
| Склады (прицеповые и пр.)                        | 280                 | Производство бумаги                               | 40                  |
| Производство мастик, шпаклевок и замазок         | 340                 | Обработка бумаги                                  | 200                 |
| Производство матрацев                            | 120                 | Производство зонтов                               | 80                  |
| Обработка бытовых материалов                     | 200                 | Продажа парфюмерных изделий                       | 100                 |
| Производство синтетических материалов            | 400                 | Производство паркета                              | 400                 |
| Обработка синтетических материалов               | 150                 | Производство макаронных изделий                   | 300                 |
| Производство изделий из синтетических материалов | 150                 | Отправка макаронных изделий                       | 250                 |
| Производство нетканых материалов                 | 120                 | Окраска (автомобилей, машин и пр.)                | 40                  |
| Механический цех                                 | 40                  | Окраска мебели                                    | 100                 |
| Производство изделий точной механики             | 40                  | Окрасочный цех                                    | 120                 |
| Производство медикаментов                        | 40                  | Фотоателье                                        | 80                  |
| Упаковка медикаментов                            | 80                  | Фотолаборатория                                   | 30                  |
| Модельная мастерская (столярная)                 | 140                 | Производство фотоаппаратов                        | 80                  |
| Столярная мастерская                             | 160                 | Обработка драгоценных камней                      | 20                  |
| Столярная мастерская (машинный зал)              | 120                 | Производство искусственных драгоценных камней     | 10                  |
| Станкостроительное производство                  | 20                  | Производство сухих батарей                        | 100                 |
| Производство металлических ящиков                | 20                  | Производство фанеры                               | 120                 |
| Производство металлоизделий                      | 30                  | Обработка древесных плит                          | 180                 |
| Металлообработка                                 | 40                  | Производство древесных плит                       | 25                  |
| Производство деревянной мебели                   | 120                 | Производство плиток из синтетических смол         | 200                 |
| Производство металлической мебели                | 60                  | Производство авторезины                           | 160                 |
| Мукомольное производство (без склада)            | 400                 | Шлифовка металлов                                 | 20                  |
| Производство зеркал                              | 25                  | Шлифовка дерева                                   | 40                  |
| Производство электромоторов                      | 70                  | Производство фарфора                              | 40                  |
|                                                  |                     | Производство деревянных дверей                    | 200                 |
|                                                  |                     | Гончарное и керамическое производство             | 40                  |
|                                                  |                     | Производство художественных изделий из керамики   | 40                  |
|                                                  |                     | Приготовление глины                               | 10                  |
|                                                  |                     | Подготовка текстильных материалов                 | 60                  |
|                                                  |                     | Подготовка бумаги                                 | 120                 |

| Назначение                                         | Мкал/м³ | Назначение                                            | Мкал/м³ |
|----------------------------------------------------|---------|-------------------------------------------------------|---------|
| Производство изделий из асбеста                    | 20      | Производство штор и защитных экранов (рулонизируемых) | 250     |
| Производство пищевых продуктов                     | 200     | Табачное производство                                 | 40      |
| Производство предметов ухода за обувью             | 200     | Обработка камня                                       | 10      |
| Производство стиральных порошков                   | 60      | Производство ковров                                   | 140     |
| Производство радиоприемников и телевизоров         | 80      | Окраска ковровых изделий                              | 120     |
| Студия радиовещания                                | 80      | Производство обоев                                    | 80      |
| Рентгеновская лаборатория                          | 40      | Красильный цех                                        | 130     |
| Разгрузочная площадка с товарами                   | 200     | Телефонная станция                                    | 20      |
| Переpletная мастерская                             | 260     | Производство телефонных аппаратов                     | 100     |
| Ателье по ремонту мягкой мебели                    | 120     | Производство оборудования для телефонных станций      | 30      |
| Ателье по ремонту различных товаров                | 100     | Телестудия                                            | 80      |
| Утюжка одежды                                      | 120     | Производство джутовых тканей                          | 100     |
| Производство синтетических смол                    | 800     | Производство тканей из натурального шелка             | 80      |
| Ателье мелкого ремонта                             | 70      | Ткацкое производство (кроме ковров)                   | 60      |
| Производство плетеных изделий (из тростника)       | 100     | Производство клеенки                                  | 160     |
| Закусочная (жареные изделия)                       | 40      | Обработка клеенки                                     | 160     |
| Закусочная-кафе                                    | 100     | Производство листового железа                         | 25      |
| Производство шарикоподшипников                     | 40      | Производство изделий из листового железа              | 30      |
| Производство мешков (из джута, бумаги, пластмассы) | 120     | Производство деревянных бочек                         | 280     |
| Производство мыла                                  | 40      | Бочарное (бондарное) производство                     | 140     |
| Лесопильный завод (без склада лесоматериалов)      | 100     | Токарные работы по дереву                             | 120     |
| Сушка овощей                                       | 260     | Токарная мастерская                                   | 40      |
| Шорная мастерская                                  | 70      | Производство электропригрывателей                     | 60      |
| Слесарная мастерская                               | 40      | Производство тракторов                                | 80      |
| Производство столовых приборов                     | 40      | Производство трансформаторов                          | 60      |
| Производство лыж                                   | 200     | Производство обмотки трансформаторов                  | 140     |
| Производство содовой воды                          | 0       | Волоочильное производство                             | 20      |
| Производство искусственного шелка                  | 80      | Закалочное отделение                                  | 100     |
| Обработка искусственного шелка                     | 50      | Производство вязаных изделий                          | 60      |
| Сварка металлов                                    | 20      | Производство люминесцентных ламп                      | 80      |
| Производство покрытий для полов                    | 120     | Приготовление черепичной глины                        | 10      |
| Сварка синтетических материалов                    | 160     | Прессование черепицы                                  | 40      |
| Сварочный цех                                      | 80      | Обжиг черепицы                                        | 0       |
| Склад угля                                         | 2000    | Сушильная печь для черепицы                           | 240     |
| Производство крепких спиртных напитков             | 120     | Типография                                            | 80      |
|                                                    |         | Производство плетеных изделий (корзин и пр.)          | 80      |

| Назначение                     | Мкал/м² | Назначение                           | Мкал/м² |
|--------------------------------|---------|--------------------------------------|---------|
| Сборка автомобилей             | 80      | Окраска стекла                       | 60      |
| Производство лаков и красок    | 1200    | Торговля изделиями из стекла         | 40      |
| Отправка лакокрасочных изделий | 300     | Производство изделий из стекла       | 40      |
| Лакировочное оборудование      | 20      | Стекольный завод                     | 160     |
| Лакировка мебели               | 40      | Бытовые помещения (деревянные шкафы) | 100     |
| Лощение бумаги                 | 20      | То же (металлические шкафы)          | 20      |
| Лакировка металла (пистолетом) | 60      | Пошив одежды                         | 120     |
| Лакировка дерева (пистолетом)  | 120     | Производство уксуса                  | 20      |
| Обработка стекла               | 40      | Цех горячей вулканизации             | 320     |
| Стекольное производство        | 20      | Производство вагонов                 | 50      |

Т а б л и ц а 8. Торговые и общественные здания

| Назначение                         | Мкал/м² | Назначение                           | Мкал/м² |
|------------------------------------|---------|--------------------------------------|---------|
| Бюро путешествий                   | 100     | Выставка машин и оборудования        | 20      |
| Продовольственный магазин          | 160     | Выставка мебели                      | 120     |
| Антикварный магазин                | 160     | Художественная выставка              | 40      |
| Торговля бытовыми приборами        | 80      | Цветочный магазин                    | 20      |
| Оружейный магазин                  | 80      | Магазин канцелярских принадлежностей | 160     |
| Приют для престарелых              | 80      | Меховой магазин                      | 40      |
| Молодежное общежитие               | 80      | Магазин по торговле сыром            | 20      |
| Банк (зал банковских операций)     | 80      | Подземные гаражи                     | 50      |
| Библиотека                         | 400     | Магазин по торговле семенами         | 150     |
| Ювелирный магазин                  | 80      | Больница                             | 80      |
| Мясной магазин                     | 10      | Часовая мастерская                   | 80      |
| Булочная                           | 80      | Гостиница (до 100 мест)              | 80      |
| Общественная столовая              | 60      | Гостиница (свыше 100 мест)           | 80      |
| Магазин резиновых изделий          | 200     | Магазин музыкальных инструментов     | 60      |
| Магазин головных уборов            | 120     | Детский сад                          | 60      |
| Кинотеатр                          | 80      | Магазин игрушек                      | 120     |
| Зоомагазин                         | 40      | Газетный киоск                       | 300     |
| Кондитерский магазин               | 100     | Книжный магазин                      | 280     |
| Магазин веревочных изделий         | 120     | Магазин бельевых товаров             | 120     |
| Обувной магазин                    | 160     | Магазин пишущих машин                | 80      |
| Магазин химикатов (лаков и красок) | 320     | Магазин швейных машин                | 60      |
| Детские ясли                       | 100     | Обувной магазин                      | 120     |
| Магазин кожаных изделий            | 160     | Универмаг                            | 100     |
| Зубоврачебный кабинет              | 40      | Кабинет врача                        | 40      |
| Аптека                             | 250     | Магазин металлоизделий               | 80      |
| Школа                              | 60      | Мебельный магазин                    | 100     |
| Церковь                            | 40      | Музей                                | 60      |
| Магазин электротоваров             | 300     | Писчебумажный магазин                | 160     |
| Автомобильный салон                | 60      | Магазин зонтов                       | 80      |
|                                    |         | Пансионат                            | 80      |

| Назначение                                | Мкал/м² | Назначение                           | Мкал/м² |
|-------------------------------------------|---------|--------------------------------------|---------|
| Аптека (включая склад)                    | 200     | Магазин по продаже спиртных напитков | 160     |
| Магазин фототоваров                       | 80      | Магазин спорттоваров                 | 180     |
| Почта                                     | 100     | Табачный магазин                     | 120     |
| Овощной магазин                           | 40      | Магазин ковровых изделий             | 200     |
| Магазин радиотоваров и телевизоров        | 100     | Театр                                | 80      |
| Ресторан                                  | 80      | Общественный туалет                  | 0       |
| Парикмахерская                            | 60      | Магазин одежды                       | 140     |
| Чайная                                    | 80      | Винный погреб                        | 40      |
| Магазин по торговле материалами для полов | 300     |                                      |         |

Таблица 9. Конторские помещения

| Назначение                 | Мкал/м² | Назначение        | Мкал/м² |
|----------------------------|---------|-------------------|---------|
| Архив                      | 1000    | Коммерческое бюро | 180     |
| Банк (служебные помещения) | 180     | Техническое бюро  | 140     |
|                            |         | Транспортное бюро | 80      |

Таблица 10. Жилые здания

| Назначение           | Мкал/м² | Назначение             | Мкал/м² |
|----------------------|---------|------------------------|---------|
| Квартира             | 80      | Чердачное помещение    | 140     |
| Бокс для автомобиля  | 70      | Гараж (в жилом здании) | 40      |
| Подвал (жилого дома) | 220     |                        |         |

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[2.1] P. Arnault, H. Ehm, J. Kruppa. — *Rapport expérimental sur les essais avec des feux naturels exécutés dans la petite installation de Maizières-lès-Metz*, CTICM, juin 1973.

[2.2] P. Arnault, H. Ehm, J. Kruppa. — *Incendies naturels avec des meubles et du papier*, CTICM, juillet 1974.

[2.3] D. Gross. — *Field burnout tests of apartment dwelling units*, Building Research division, Institute for Applied Technology, National Bureau of Standards, Washington D. C., U. S. A.

[2.4] K. Kawagoe. — *Fire behavior in rooms*, Building Research Institute, Ministry of Construction, Tokyo, Japan.

[2.5] S. E. Magnusson, S. Thelandersson. — *Temperature-time curves of complete process of fire development*, Bulletin 16, 1970, Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Lund Institute of Technology, Lund, Sweden.

[2.6] B. Barthélémy. — *INNAT: programme de calcul automatique du déroulement des incendies naturels et de la réponse thermique des charpentes métalliques*, CTICM, février, 1977.

[2.7] V. Babrauskas. — COMPF: *a program for calculating post-flashover fire temperatures*. Fire Research Group, University of California, Berkeley, U.S.A., 1975.

[2.8] O. Pettersson, S. E. Magnusson, J. Thor. — *Fire Engineering Design of Steel Structures*. Swedish Institute of Steel Construction, Stockholm, Sweden, 1976.

[2.9] E. G. Butcher, G. J. Langdon-Thomas, G. K. Bedford. — *Fire and car-park buildings*. Fire note n° 10, Fire Research Station, Borehamwood, England, 1968.

[2.10] R. G. Gewain. — *Fire in an exposed steel parking structure*, Modern Steel Construction, U. S. A., 1973.

[2.11] L. M. Harris. — *Survey of Fire experience in Automobile parking Structures in the United States and Canada*, Marketing Research Associates, U. S. A. 1972.

[2.12] M. Gretener. — *Détermination des mesures de protection découlant de l'évaluation du danger potentiel d'incendie*. Association des établissements cantonaux d'assurance contre l'incendie et Service de Prévention d'incendie pour l'industrie et l'artisanat, Lausanne, Suisse, 1973.

[2.13] D. Cluzel, P. Chardot. — *Evaluation du risque d'incendie*. Union Technique Interprofessionnelle des Fédérations nationales du Bâtiment et des Travaux Publics, Saint-Rémy-les-Chevreuse, France, 1977.

## Глава 3. ОГНЕСТОЙКОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### 3.1. ВВЕДЕНИЕ

В отличие от стали (гл. 4) и дерева (гл. 6) бетон представляет собой материал, которому весьма трудно найти сколь-нибудь простое и общее определение, поскольку его поведение зависит от его составляющих — цемента и заполнителя.

Тем не менее за железобетоном признают достаточно высокую огнестойкость в зависимости от того, насколько хорошо его арматура защищена слоем бетона и при необходимости дополнительным облицовочным материалом. Однако опыт показывает, что под влиянием тепла может происходить растрескивание бетона<sup>1</sup>, приводящее к обнажению арматуры и последующему быстрому разрушению конструкции. Особенно опасным такое явление оказывается в случае преднапряженного железобетона, когда обнажение напрягающей арматуры быстро влечет за собой выход конструкции из строя.

Кроме того, композиционный характер самого материала в значительной степени затрудняет определение его поведения, поэтому необходимо действовать с большой долей осторожности и эмпиризма, тем более что соответствие между расчетом и исполнением может оказаться весьма относительным, поскольку значительную роль здесь играет технология укладки арматуры и состав бетона.

Таким образом, было бы неверно полагать, что применение железобетона позволяет решить все проблемы огнестойкости конструкций: как и другие строительные материалы, он требует самого тщательного изучения и с этой точки зрения.

---

<sup>1</sup> Только при высокой влажности бетона. (Примеч. науч. ред.)

## 3.2. ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА БЕТОН

При воздействии тепла в бетоне происходят физические процессы и химические реакции, приводящие к изменению его механических и теплофизических свойств. Кроме этого, в нем возникают внутренние напряжения, обусловленные различием термических свойств цемента и заполнителя, а также термическим градиентом в массе бетона.

**3.2.1. Физические и химические изменения в бетоне.** Портландцемент имеет обычно следующий состав [3.1]:  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  (обозначение  $\text{C}_3\text{S}$ ) — 45%;  $\beta\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  (обозначение  $\beta\text{-}\text{C}_2\text{S}$ ) — 25%, а также переменное количество  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  (обозначение  $\text{C}_3\text{A}$ ) и  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  (обозначение  $\text{C}_4\text{AF}$ ).

После гидратации смеси этих компонентов образуется так называемый цементный камень.

Весьма затруднительно провести различие между водой, химически связанной с компонентами цемента, и водой, которая задерживается в бетоне за счет простой адсорбции и в отличие от предыдущей способна легко испаряться. Тем не менее количество химически связанной (неиспаряемой) воды можно приблизительно определить из состава цементного камня с помощью формулы

$$w_n/w_c = 0,199w(\text{C}_3\text{S}) + 0,152w(\text{C}_2\text{S}) + 0,561w(\text{C}_3\text{A}) + 0,178w(\text{C}_4\text{AF}), \quad (3.1)$$

где  $w_n/w_c$  — отношение массы химически связанной воды, содержащейся в цементном камне, к массе цемента;  $w(x)$  — массовая относительная концентрация компонента  $x$ .



РИС. 3.1. ОБРУШЕНИЕ БЕТОННОЙ КОЛОННЫ



РИС. 3.2. ОБЩИЙ ВИД КОНСТРУКЦИИ ИЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА ПОСЛЕ ПОЖАРА

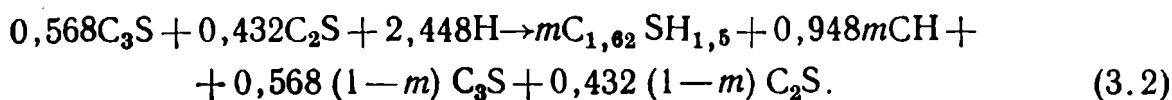
Таблица 3.1

| Компоненты цемента  | Массовая относительная концентрация | Молярная относительная концентрация |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| $C_3S$              | 0,635                               | 0,568                               |
| $\beta\text{-}C_2S$ | 0,365                               | 0,432                               |

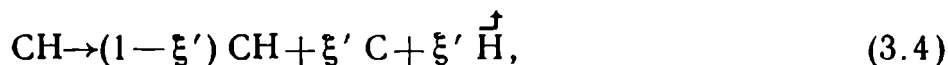
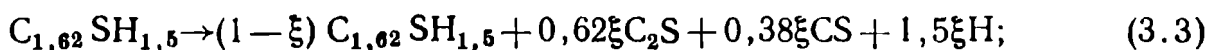
Эту формулу можно упростить, если пренебречь в виду их небольшого количества двумя последними из указанных выше компонентов цемента, что даст идеальный состав цемента, определяемый по табл. 3.1.

Отсюда следует, что после полной гидратации относительное количество химически связанной воды в цементном камне, полученном из идеального цемента, составляет  $w_n/w_c = 0,216$ . Поэтому количество молей воды, способных соединиться с одним молем идеального цемента, составляет  $[0,216 (0,568 \cdot 228,3 + 0,432 \cdot 172,2)]/18 = 2,448$  моля.

Кроме того, два основных компонента цемента при гидратации образуют соединение, отвечающее формуле  $C_{1,62}SH_{1,5}$  [3.3]. В связи с этим уравнение гидратации цемента можно записать в виде



Коэффициент  $m$  — степень гидратации — выражает здесь незаконченность реакции, а символом  $H$  обозначена вода  $H_2O$ . Под влиянием тепла дегидратация начинается с момента окончания испарения адсорбированной воды, т. е. примерно при температуре  $100^\circ C$ , и продолжается до температуры, превышающей  $800^\circ C$ . При этом происходят следующие химические реакции:



где  $\xi$  и  $\xi'$  — коэффициенты хода реакции.

На рис. 3.3 графически представлен процесс обеих реакций в зависимости от величин  $\xi$  и  $\xi'$  [3.1]. Аналогичным образом испарение адсорбированной воды можно описать с помощью коэффициента  $\xi''$  (рис. 3.4).

При температурах от 0 до  $200^\circ C$  испаряющаяся химически несвязанная вода удаляется из бетона и одновременно происходит увеличение объема зерен цемента. Отсюда следует увеличение прочности бетона на сжатие, которое является тем более ощутимым, чем моложе бетон<sup>1</sup>. Это явление проиллюстрировано на рис. 3.5, на котором представлена прочность бетона на сжатие в зависимости от температуры для бетона в различном возрасте [3.4].

<sup>1</sup> По нашему мнению, это явление связано с высыханием бетона и с дополнительной гидратацией цемента. (Примеч. науч. ред.)

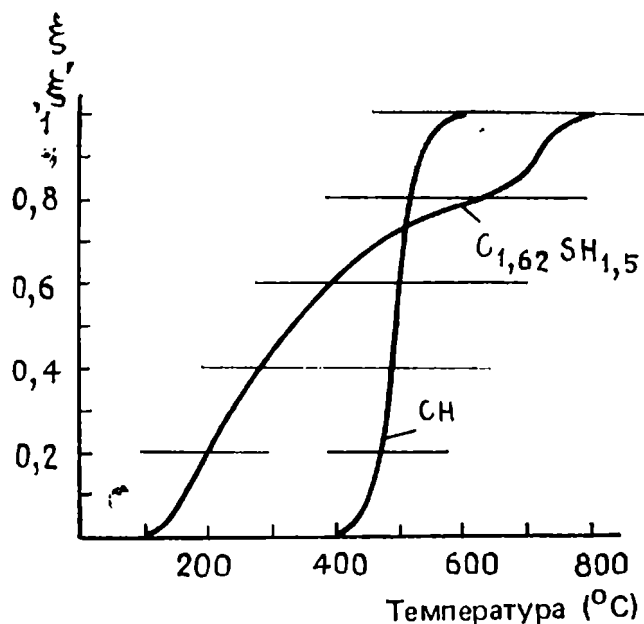


РИС. 3.3

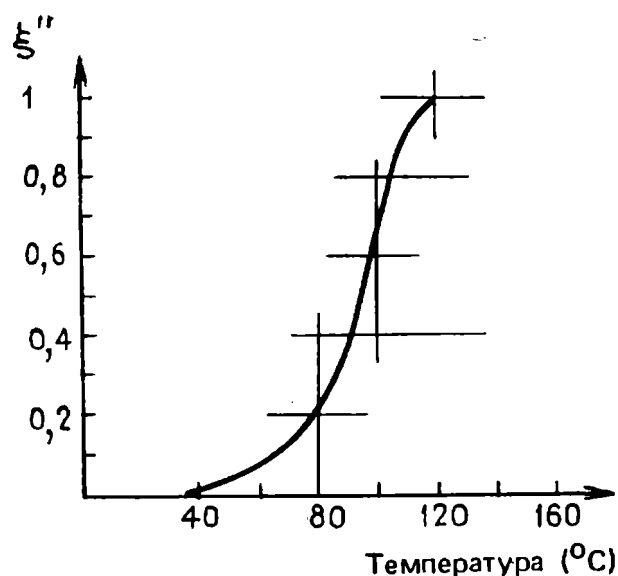


РИС. 3.4

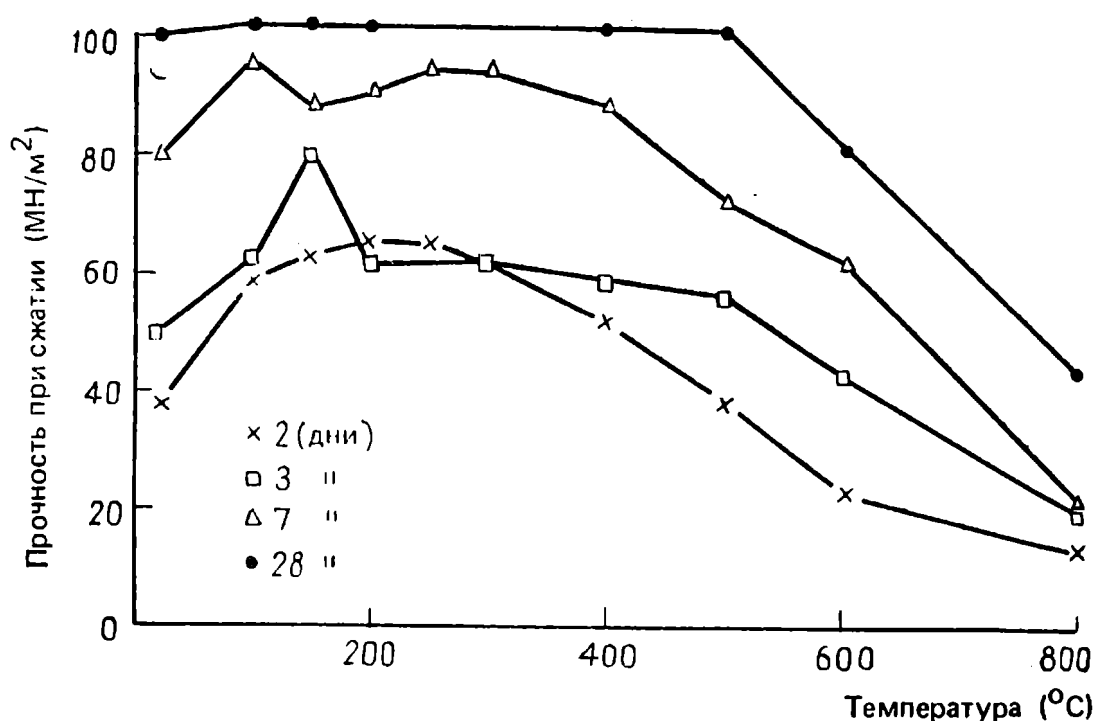


РИС. 3.5

**3.2.2. Внутренние термические напряжения.** Коэффициенты температурного расширения цементного камня и заполнителей весьма различны. Можно отметить, что коэффициент температурного расширения бетона в общем случае значительно ближе к аналогичному параметру заполнителя, чем цементного камня, поэтому в последнем возникают значительные напряжения, вызывающие образование трещин.

Кроме того, температура внутри бетонного элемента также весьма неоднородна (см. разд. 3.5), в связи с чем в нем возникают неравномерные деформации, сопровождаемые температурными напряжениями.

**3.2.3. Следствия.** Результатом физико-механических и химических процессов в нагретом бетоне может явиться отслаивание заполнителя от цементного камня вследствие появления трещин на их контакте, что приводит иногда к растрескиванию всего элемента.

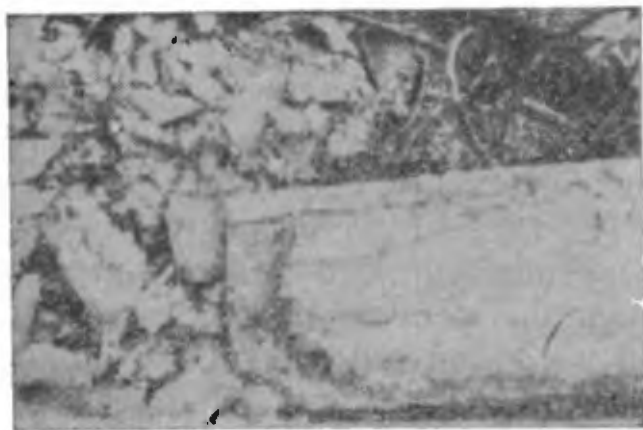
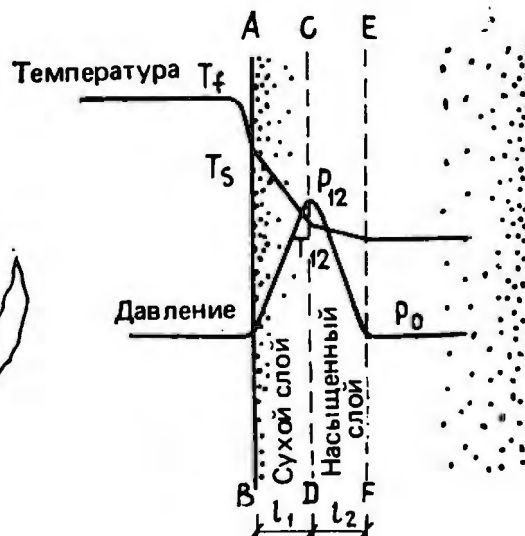


РИС. 3.6. РАСТРЕСКИВАНИЕ И ВЫКРАШИВАНИЕ БЕТОНА В УГЛУ БАЛКИ



РИС. 3.7



Механизм растрескивания вследствие миграции химически несвязанной воды в бетоне изучен еще явно недостаточно. Среди многочисленных объяснений этого явления лишь одно из них [3.5] представляется более или менее удовлетворительным.

С началом проникания тепла внутрь бетонного элемента начинается испарение воды в тонком слое бетона близ его поверхности. Большая часть образовавшегося таким образом пара вновь конденсируется в более холодных соседних частях тела бетона.

С течением времени толщина высушенного слоя увеличивается и параллельно образуется полностью насыщенный слой, куда переходит вода из высушиваемого слоя. Переходный участок между этими слоями соответствует зоне очень высокого давления (рис. 3.7). В то же время температура поверхности, обращенной к очагу пожара, продолжает повышаться, в связи с чем возрастает температурный градиент между этой поверхностью и разделительной плоскостью  $CD$ . Вода из насыщенного слоя, находящаяся в непосредственной близости от плоскости  $CD$ , также начинает испаряться. Однако она уже не может больше вновь конденсироваться в более холодных зонах, так как отделена от них насыщенным слоем, пар через который практически не проходит. Поэтому испаряющаяся вода совершает путь по обратному маршруту, пересекая высушенный слой  $ABCD$  и выходя наружу на обращенную к огню поверхность  $AB$ . Если паропроницаемость материала невелика, то давление в плоскости  $CD$  продолжает расти до тех пор, пока возникшие при этом внутренние напряжения не превзойдут прочность бетона. В результате происходит резкое отделение слоя бетона шириной, примерно равной ширине высушенного слоя. Это явление и называется растрескиванием бетона. Если же описанное состояние не достигается, то испарение повышает огнестойкость элемента. При этом на испарение воды расходуется значительное количество тепла, которое, не передаваясь бетону, задерживает его нагрев.

Представляется весьма интересным приведенному качественному объяснению явления предложить количественную трактовку.

По существу между ширинами  $l_1$  и  $l_2$  высушенного и насыщенного слоев существует соотношение

$$l_2 = \delta l_1 [\varphi / (\varepsilon - \varphi)], \quad (3.5)$$

где  $\delta$  — количество воды, испарившейся в слое  $ABCD$  и конденсировавшейся в слое  $CDEF$ ;  $\varepsilon$  — общая пористость бетона ( $\text{см}^3/\text{см}^3$ );  $\varphi$  — степень начального увлажнения материала (объем воды на единицу объема бетона).

Если предположить наличие квазистационарного режима в зоне  $ABCD$ , то тепловой баланс на обращенной к огню поверхности  $AB$  при условии пренебрежения массовой удельной теплоемкостью можно записать в виде

$$\Phi = \frac{T_f - T_s}{1/K} = \frac{T_s - T_{12}}{l_1/\lambda}, \quad (3.6)$$

откуда

$$T_s = \frac{T_{12} + T_f (K l_1 / \lambda)}{1 + K l_1 / \lambda}, \quad (3.7)$$

а также

$$\Phi = \frac{K (T_f - T_{12})}{1 + K l_1 / \lambda}. \quad (3.8)$$

В этих выражениях величина  $K$  представляет собой полный коэффициент теплоотдачи на поверхности элемента, а  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности бетона (см. разд. 3.3.2.1).

Скорость движения плоскости  $CD$  вследствие испарения составляет

$$v = \Phi / (L_v \varepsilon), \quad (3.9)$$

где  $L_v$  — скрытая теплота испарения воды.

Полную скорость в насыщенном слое  $CDEF$  можно выразить с помощью закона Дарси:

$$v' = \frac{k}{\eta} [(P_{12} - P_0) / l_2], \quad (3.10)$$

где  $k$  и  $\eta$  — соответственно проницаемость бетона и вязкость пара.

При этом растрескивание бетона произойдет при одновременном выполнении двух условий:

$$P_{12} - P_0 = \sigma_b^* \quad (\text{прочность бетона}); \quad (3.11)$$

$$v' < v,$$

что можно также выразить в виде неравенства

$$\varphi / \varepsilon > \frac{1}{1 + [A / (\varepsilon k \sigma_b)] \cdot [\lambda / (\lambda + B)]}, \quad (3.12)$$

где

$$A = [\eta \delta l_1 K (T_f - T_{12})] / (k \sigma_b L_v \varepsilon) \quad \text{и} \quad B = K l_1. \quad (3.13)$$

---

\* Нельзя в таком виде записывать равенство; это следует сделать так:  $\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} (P_{12} - P_0) = \sigma_b$ . Необходимо перевести давление (воздействующий на структуру бетона фактор) в напряжения в структуре бетона. (Примеч. науч. ред.)

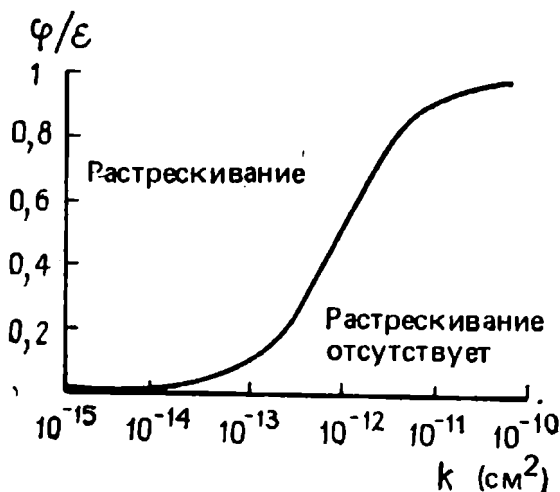


РИС. 3.8

Принимая, в частности,  $\varepsilon = 0,3$ ,  $\sigma_b = 170 \text{ Н/см}^2$  и  $\lambda = 0,86 \text{ ккал/(м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С)}$ , получим  $A \approx 2,1 \cdot 10^{-10} \text{ Н}$  и  $B \approx 3,11 \text{ ккал/(м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С)}$ .

Теперь можно построить кривую, приведенную на рис. 3.8\*, которая очерчивает область растрескивания бетона.

Для случая, когда опасность растрескивания невелика, сначала теоретически [3.5], а затем и экспериментально [3.6] показано, что время огнестойкости элемента увеличивается на величину, определяемую с помощью уравнения, основанного на полуэмпирическом правиле «момента влажности»:

$$\Delta t = t \frac{b}{1 + 0,25t} \frac{M}{M_s} \varphi_m, \quad (3.14)$$

где  $t$  — время огнестойкости для сухого бетона;  $b$  — коэффициент, зависящий от вида бетона;  $M$  и  $M_s$  — моменты влажности;  $\varphi_m$  — средняя относительная влажность бетонного элемента.

Отметим, что коэффициент  $b$  равен: для обычного бетона 5,5; для бетона на легких заполнителях 8; для ячеистого бетона 10.

Момент влажности представляет собой момент относительной влажности бетона  $\varphi$  относительно обращенной к огню поверхности элемента шириной  $L$ :

$$M = \int_0^L \varphi x dx. \quad (3.15)$$

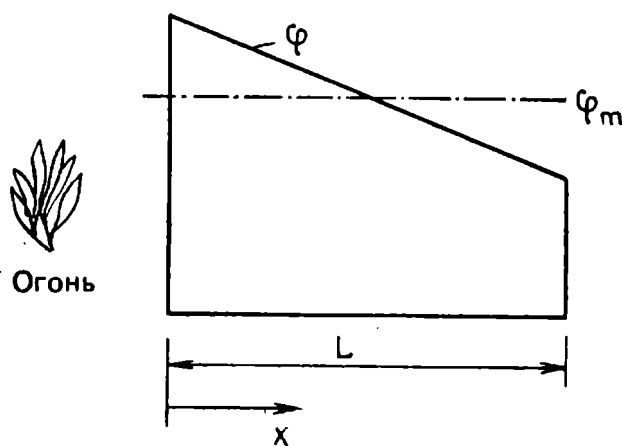


РИС. 3.9

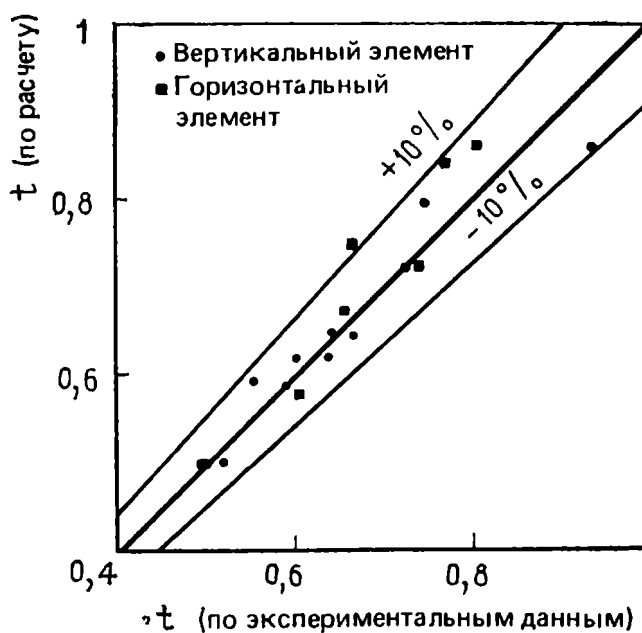


РИС. 3.10

\* В связи с неправильной записью (3.11) кривая на рис. 3.8 будет иметь другой вид. Полученные из приведенного расчета выводы не соответствуют экспериментальным данным. (Примеч. науч. ред.)

Момент  $M_s$  можно получить, если учесть среднюю влажность элемента (рис. 3.9):

$$M_s = (L^2/2) \varphi_m. \quad (3.16)$$

На рис. 3.10 приведены результаты экспериментальной проверки этой теории [3.6].

В заключение отметим, что легкие бетоны, особенно с заполнителем из керамзита, значительно медленнее, чем обычные бетоны, отдают излишнюю адсорбированную воду. Например, при одинаковых условиях твердения легкий бетон шестимесячного возраста содержит столько же воды, сколько обычный бетон трехмесячного возраста [3.7]. Таким образом, легкие бетоны более склонны к растрескиванию<sup>1</sup> по сравнению с обычными, хотя иногда считается, что кремнистые заполнители, не применяемые в легких бетонах, являются главной причиной растрескивания.

### 3.3. ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕТОНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

В отличие от стали и даже от дерева, которые являются достаточно однородными материалами с малоизменчивыми свойствами, бетон не отличается сколь-нибудь постоянными механическими и теплофизическими характеристиками. Дело в том, что они в огромной степени зависят от состава бетона (расхода и вида цемента и заполнителей), а также от условий его приготовления.

**3.3.1. Механические свойства.** Рассмотрим последовательно прочность бетона при растяжении и сжатии, а также изменение его модуля упругости и модуля сдвига в зависимости от температуры.

**3.3.1.1. Прочность бетона при растяжении.** Большинство экспериментальных данных свидетельствует о немедленном и непрерывном снижении прочности бетона на растяжение при повышении температуры. К сожалению, эти данные не слишком многочисленны и весьма разноречивы, в связи с чем в отсутствие более надежной информации представляется целесообразным, как это сделано в [3.8], принять достаточно крутую кривую убывания прочности.

Однако следует отметить, что скорость нагрева не оказывает сколько-нибудь существенного влияния на снижение относительной прочности при растяжении (см. рис. 3.11): во время испытания, описываемого кривой 1, образец не был изолирован, а при испытаниях, описываемых кривыми 2 и 3, образцы были защищены слоями минеральной ваты толщиной соответственно 5 и 10 мм.

Разумеется, внутренние напряжения, которые мы определили в разд. 3.2.2, зависят от скорости нагрева, определяемой толщиной теплоизоляции и связанной с различными температурными градиентами.

**3.3.1.2. Прочность бетона при сжатии.** При нагревании влажность бетона понижается, что на первом этапе влечет за собой повышение

---

<sup>1</sup> Это не соответствует экспериментальным данным. Тяжелые бетоны разрушаются при массовой влажности 3% и более, а легкие — более 8—14% (Примеч. науч. ред.)

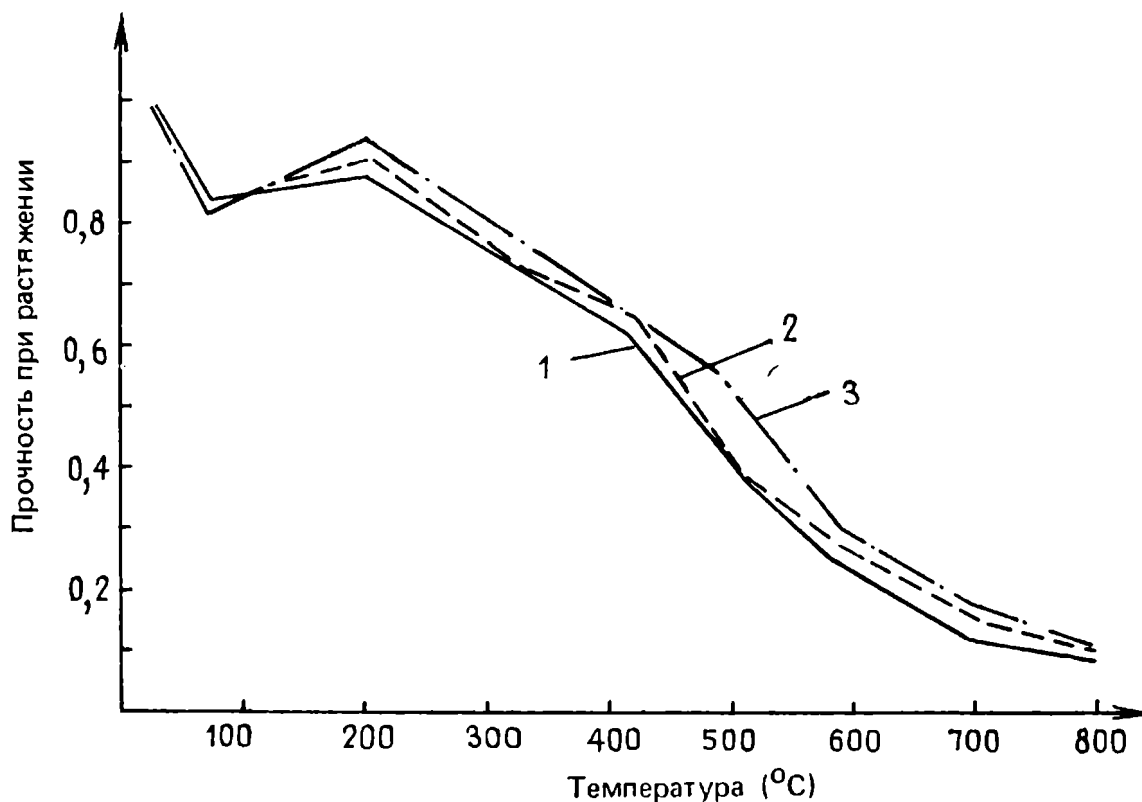
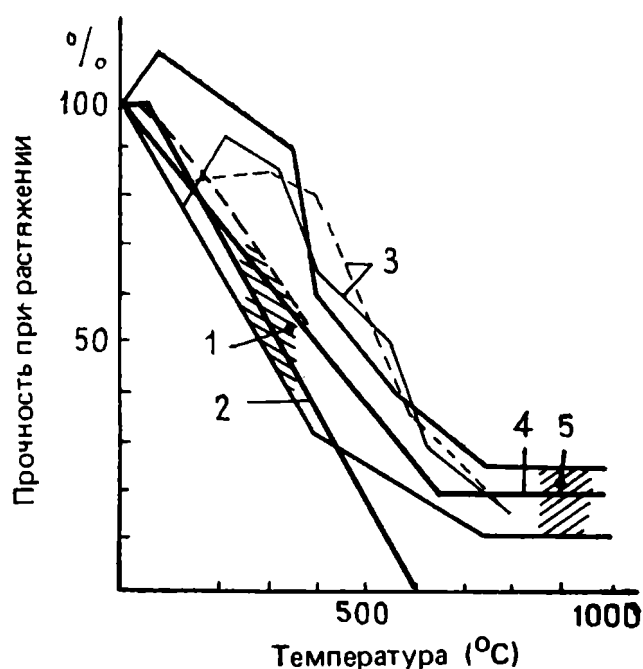


РИС. 3.11

РИС. 3.12. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

1 — зона данных, приведенных в [3.8]; 2 — кривая, рекомендованная в [3.8]; 3 — по работе [3.4]; 4 — по работе [3.10]; 5 — по работе [3.10]



его прочности при сжатии (см. рис. 3.5). Известно, что сухие бетоны отличаются более высокой прочностью при сжатии. Однако при температурах порядка 200—300 °C эта закономерность нарушается, и сопротивление бетона сжатию резко падает, причем такое снижение прочности зависит, помимо всего прочего, от природы заполнителя (рис. 3.13).

Факторы, влияющие на прочность бетона при сжатии, весьма многочисленны, в частности, чем больше соотношение цемента и заполнителей (т. е. чем больше цемента по сравнению с заполнителем), тем быстрее падает прочность бетона [3.12] (рис. 3.15).

Природа других видов заполнителя также оказывает определенное влияние на прочность бетона при сжатии (рис. 3.16). На графике при-

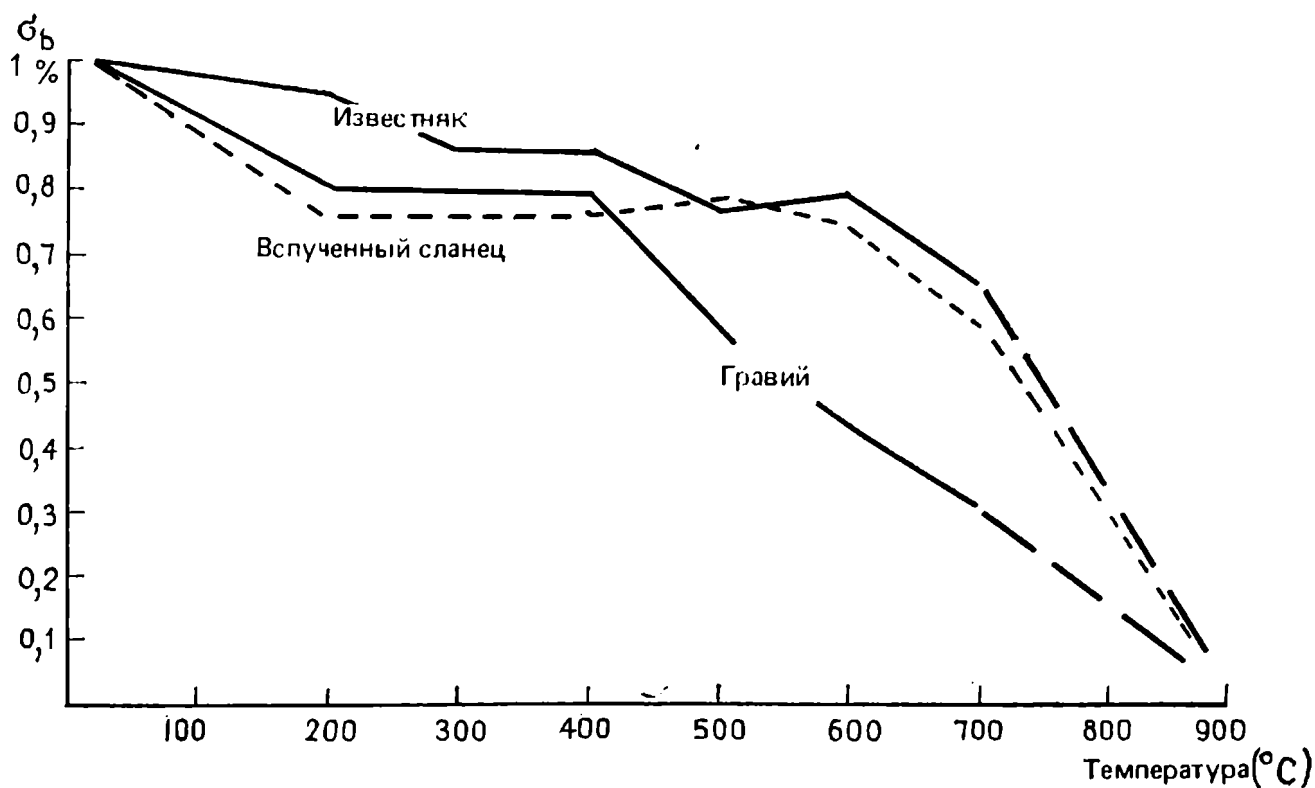


РИС. 3.13

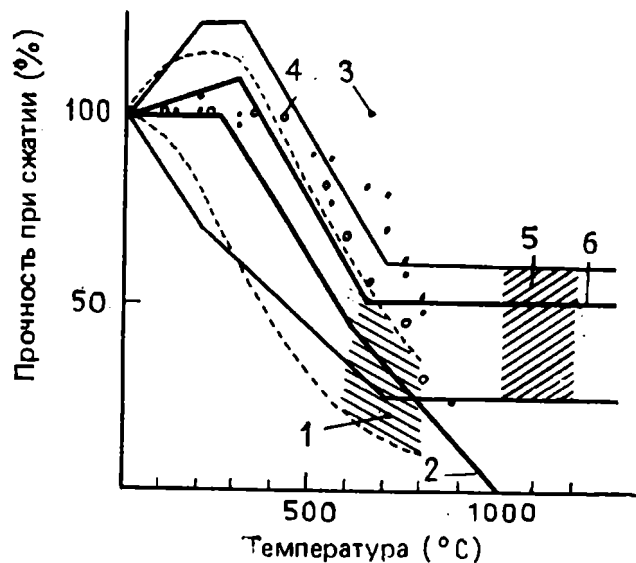


РИС. 3.14. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ НА ПРОЧНОСТЬ БЕТОНА ПРИ СЖАТИИ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

1 — зона данных, приведенных в [3.8]; 2 — кривая, рекомендованная в [3.8]; 3 — бетон на легких заполнителях [3.11]; 4 — бетон на силикатных заполнителях [3.11]; 5 — по работе [3.10]; 6 — по работе [3.10]

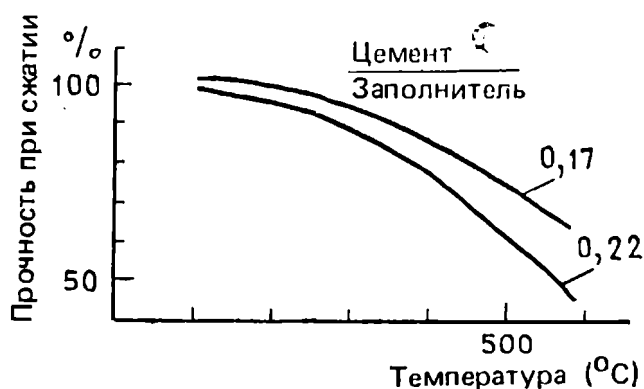


РИС. 3.15

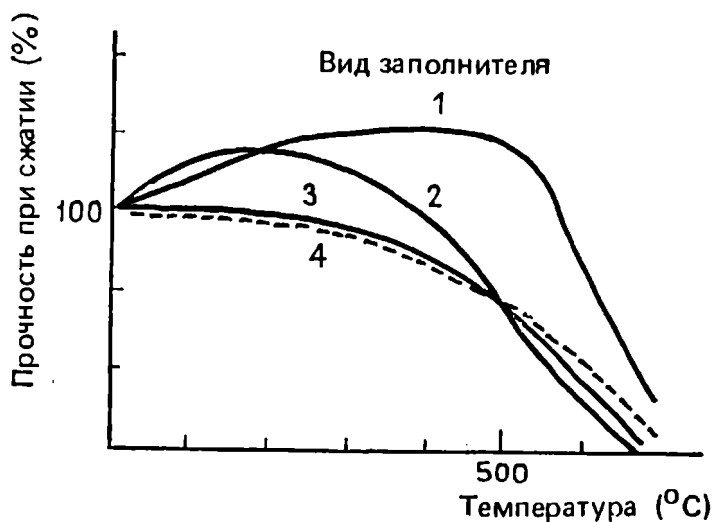


РИС. 3.16

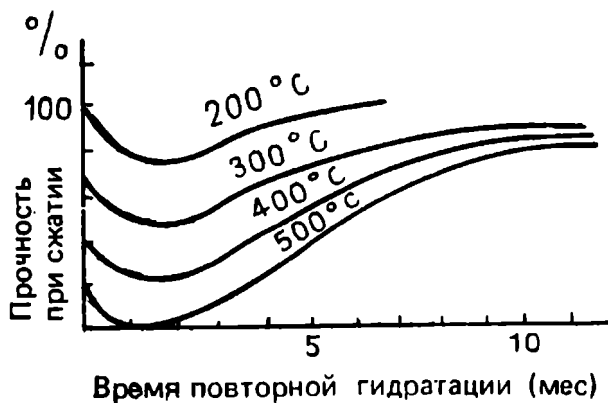


РИС. 3.17

ведено сравнение прочности четырех видов бетона на портландцементе, полученных путем использования в качестве заполнителей юрского известняка (кривая 1), базальта (кривая 2), рейнского песка (кривая 3) и молотого клинкера (кривая 4).

Кроме того, интересно знать, как ведет себя бетон после пожара с целью его возможного повторного использования. Прежде всего его прочность при сжатии после нагрева и остывания становится значительно ниже, чем была до нагрева. Однако в результате постепенной регидратации эта прочность в значительной мере восстанавливается при условии, что при нагреве не была нарушена структура бетона ( $\theta < 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) (рис. 3.17) [3.13].

По другим данным [3.14], бетон в холодном состоянии не восстанавливает своих свойств. При наличии различных точек зрения относительно критических температур, воздействию которых может подвергаться бетон, целесообразно прибегать к отбору образцов и к испытаниям.

**3.3.1.3. Модули упругости бетона.** Удаление содержащейся в бетоне воды (несжимаемая фаза) вызывает достаточно быстрое падение модулей упругости и сдвига бетона после первой стадии нагрева (от 0 примерно до  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), при которой иногда наблюдается незначительное повышение модуля  $E$ . Такое явление можно сравнить с изменением прочности бетона при сжатии, ибо в холодном состоянии существуют многочисленные эмпирические зависимости между этими двумя характеристиками. Поэтому вполне логичным представляется установить подобные соотношения и для нагретого состояния. Однако результаты экспериментов показывают, что начальное повышение модуля упругости  $E$  является куда менее ощутимым, чем повышение прочности при сжатии (соответственно 1—5% и 20—25%).

Модуль  $E$  измеряют различными методами: помимо прямых измерений продольных деформаций на цилиндрических образцах используют косвенный метод, согласно которому к призме прикладывают сжимающую нагрузку и с помощью оптического устройства измеряют угловые перемещения между двумя выбранными точками. После пожара бетон теряет значительную часть своей прочности, и его модуль упругости  $E$  оказывается значительно уменьшенным. Однако, по данным [3.13], по мере регидратации значение модуля упругости частично восстанавливается при условии, что температура не превышала  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рис. 3.18).

**3.3.2. Теплофизические свойства.** Рассмотрим последовательно изменение теплопроводности, объемной удельной теплоемкости и температурных деформаций бетона в зависимости от температуры.

**3.3.2.1. Теплопроводность.** Она изменяется в широких пределах в зависимости от вида заполнителей бетона. Очевидно, такая изменчивость имеет место и при высокой температуре, тем более что по существу невозможно экспериментально строго определить это теплофизическое свойство. Тем не менее можно вывести общие тенденции, отраженные в рис. 3.21 [3.9].

И все же возможно более точно оценить теплопроводность бетона теоретическим путем исходя из свойств его компонентов [3.1].

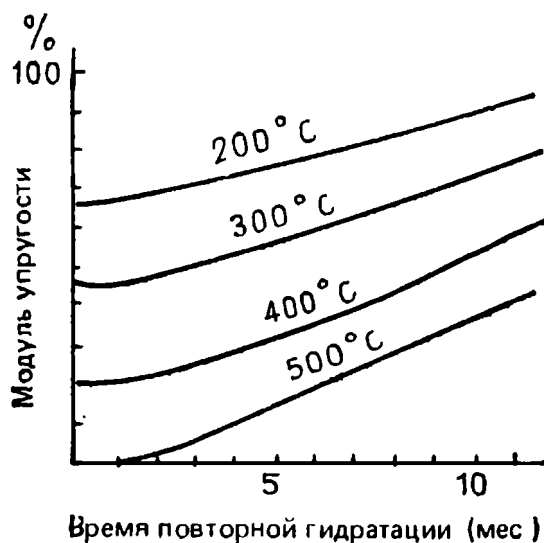


РИС. 3.18

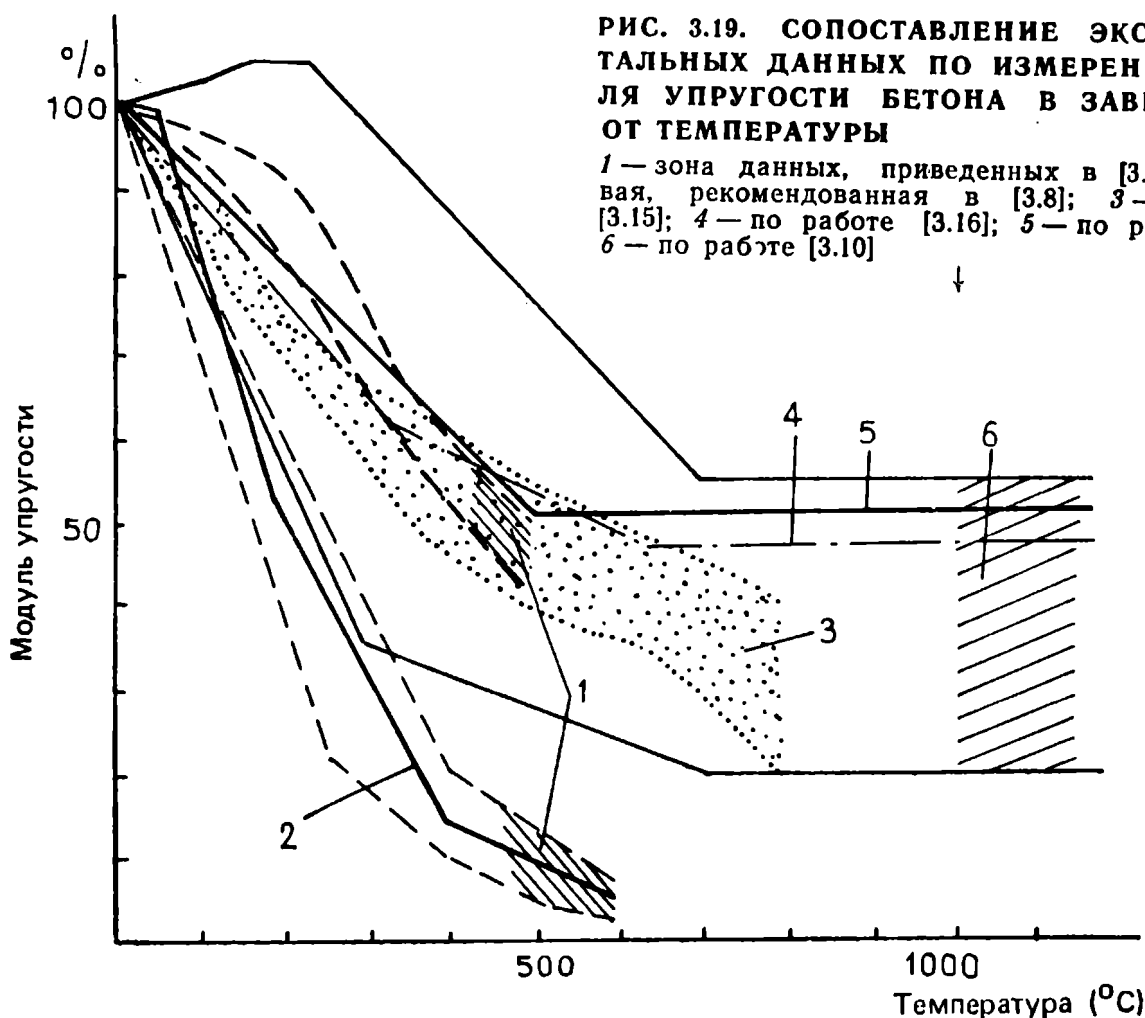


РИС. 3.19. СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО ИЗМЕРЕНИЮ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ БЕТОНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

1 — зона данных, приведенных в [3.8]; 2 — кривая, рекомендованная в [3.8]; 3 — по работе [3.15]; 4 — по работе [3.16]; 5 — по работе [3.10]; 6 — по работе [3.10]

Теплопроводность смеси двух твердых фаз определяется соотношением

$$\lambda_{12} = (v_1 \lambda_1 + \alpha v_2 \lambda_2) / (v_1 + \alpha v_2), \quad (3.17)$$

где

$$\alpha = n \lambda_1 / [(n-1) \lambda_1 + \lambda_2], \quad (3.18)$$

а  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  представляют собой теплопроводность соответствующих фаз с объемным относительным количеством  $v_1$  и  $v_2$ . Коэффициент  $n$  зависит от геометрического распределения фаз и должен быть установлен экспериментальным путем. Если  $n \rightarrow \infty$ , то мы имеем две фазы, расположенные слоями параллельно тепловому потоку ( $\lambda_{12} = v_1 \lambda_1 +$

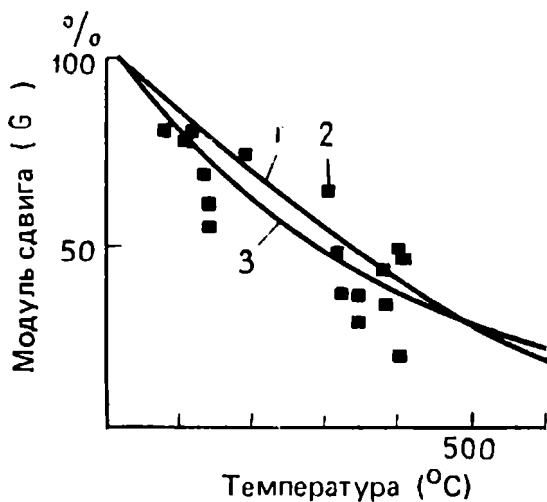


РИС. 3.20. СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ МОДУЛЯ СДВИГА БЕТОНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

1 — бетон на силикатных заполнителях [3.17]; 2 — данные, приведенные в [3.7]; 3 — кривая, рекомендованная в [3.7]

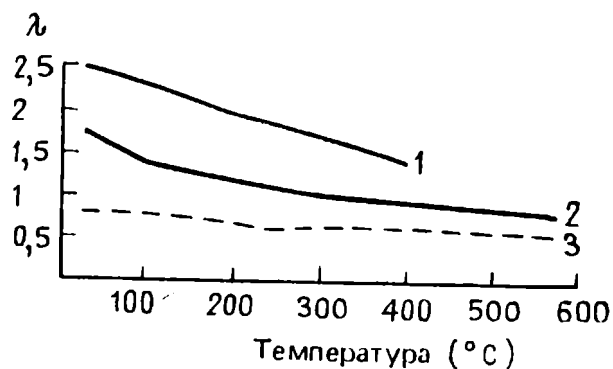


РИС. 3.21. ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ  $\lambda$ , ккал/(м·ч·°С) ОБЫЧНЫХ БЕТОНОВ НА ГРАВИЙНОМ И ИЗВЕСТКОВОМ ЗАПОЛНИТЕЛЕ (ИЗ РАЙОНОВ РЕК САМБР И МЭЗ) И ЛЕГКОГО БЕТОНА НА ВСПУЧЕННОМ СЛАНЦЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ, °С

1 — гравий; 2 — известняк; 3 — вспученный сланец

+  $v_2\lambda_2$ ), в то время как при  $n = 1$  эти слои перпендикулярны тепловому потоку ( $1/\lambda_{12} = v_1/\lambda_1 + v_2/\lambda_2$ ).

Опыт показывает, что для цементного камня значение  $n = 1,5$  является вполне приемлемым приближением.

С другой стороны, если предположить, что первую фазу представляет цементный камень, а вторую фазу — воздух, то пористость смеси  $\varepsilon$  можно определить из выражения

$$\varepsilon = [(v_1 + v_2) - v_1] / (v_1 + v_2) = v_2, \quad \text{ибо } v_1 + v_2 = 1. \quad (3.19)$$

Тогда теплопроводность цементного камня можно записать в виде

$$\lambda_{12} = \lambda_1 \frac{\lambda_2 + 0,5\lambda_1 - 0,5\varepsilon(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_2 + 0,5\lambda_1 + \varepsilon(\lambda_1 - \lambda_2)}. \quad (3.20)$$

Для обычного цементного камня, состав которого соответствует данным табл. 3.2, значения  $\lambda_1$  приведены в табл. 3.3.

Для теплопроводности воздуха принято значение  $\lambda_2 = 0,018$  ккал/(м·ч·°С).

Пористость определяется по формуле

$$\varepsilon = (d - \rho) / d, \quad (3.21)$$

где  $d$  и  $\rho$  — соответственно действительная и кажущаяся плотности.

Таблица 3.2

| Компоненты цементного камня | Массовая относительная концентрация | Молярная относительная концентрация |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| $C_{1,62}SH_{1,5}$          | 0,610                               | 0,463                               |
| CH                          | 0,241                               | 0,438                               |
| $C_3S$                      | 0,095                               | 0,056                               |
| $\beta-C_2S$                | 0,054                               | 0,043                               |

Таблица 3.3

| Температура, °С | $\lambda_1$ , ккал/(м·ч·°С) | Температура, °С | $\lambda_1$ , ккал/(м·ч·°С) |
|-----------------|-----------------------------|-----------------|-----------------------------|
| 0               | 1,35                        | 600             | 1,22                        |
| 300             | 1,65                        | 700             | 1,08                        |
| 400             | 1,65                        | 1000            | 0,98                        |
| 500             | 1,44                        |                 |                             |

Действительную плотность  $d$  определяют из выражения

$$d = \frac{1 + m\delta (w_n/w_c)}{(1/d^*) + m\delta (1/\rho_n) (w_n/w_c)}, \quad (3.22)$$

где  $m$  и  $w_n/w_c$  — соответственно коэффициенты, учитывающие степень гидратации цемента и количество химически связанной (неиспаряемой) воды, которые были рассмотрены в разд. 3.2.1.

В качестве характеристик плотности негидратированного цемента и химически связанной воды принимаются соответственно значения  $d^* = 3,15$  и  $\rho_n = 1,22$ .

Коэффициент  $\delta$  учитывает потерю неиспаряемой воды и определяется из выражения

$$\delta = \frac{[(P_T/P_{298}) - (P_{1273}/P_{298})]}{1 - (P_{1273}/P_{298})}. \quad (3.23)$$

В этой формуле  $P_T$  — вес цементного камня при температуре  $T$ . Отношение  $P_T/P_{298}$  следует определять термогравиметрическим методом.

Кажущуюся плотность  $\rho$  можно найти из выражения

$$\rho = \frac{1 + m (w_n/w_c)}{1/d + [1/\rho_n (w_0/w_c)]} \cdot \frac{P_T/P_{298}}{[1 + (\Delta l/l_{298})]^3}, \quad (3.24)$$

где  $\Delta l$  — дилатометрическое удлинение образца длиной  $l$  при температуре 298 °K (+25 °С).

Например, для цементного камня, полученного на основе эталонного цемента, состав и теплопроводность которого приведены в табл. 3.2 и 3.3, изменения  $d$ ,  $\rho$  и  $\varepsilon$  определяются графиком на рис. 3.22 ( $w_0/w_c = В/Ц = 0,5$ ).

Остается еще определить теплопроводность заполнителей, которые вместе с цементным камнем являются основными компонентами бетона. К сожалению, в отличие от цементного камня теплопроводность заполнителей изменяется в широких пределах, поскольку зависит от их природы. Кроме того, именно заполнитель занимает наибольший объем в смеси цемент—заполнитель. И, наконец, измерение теплопроводности является весьма трудным и тонким делом.

Большинство заполнителей, применяемых при производстве бетона, представляет собой смесь кристаллических и аморфных структур, причем кристаллические структуры характеризуются значительно более высокой теплопроводностью, чем аморфные. Именно поэтому

легкие бетоны, в которых заполнители имеют пористую аморфную структуру, отличаются меньшей теплопроводностью, чем обычный бетон.

На рис. 3.23 приведены кривые теплопроводности, полученные путем измерений (сплошные линии), экстраполяции (редкий пунктир) и расчета (частый пунктир) для шести типов заполнителей, применяемых в обычных и легких бетонах [3.1].

Таким образом, зная теплопроводность цементного камня  $\lambda_m$  и заполнителя  $\lambda_a$ , можно найти теплопроводность бетона  $\lambda_b$ , пользуясь формулой

$$\lambda_b = \lambda_m \frac{v_m (\lambda_a + 2\lambda_m) + 3v_a \lambda_a}{v_m (\lambda_a + 2\lambda_m) + 3v_a \lambda_m} . \quad (3.25)$$

В этой формуле  $v_a$  и  $v_m$  — объемные относительные количества заполнителя и раствора.

Приведенная формула позволяет определить диапазон теплопроводности обычных и легких бетонов, который представлен на рис. 3.24.

**3.3.2.2. Объемная удельная теплоемкость.** По этому вопросу имеется сравнительно немного экспериментальных данных, поскольку измерение объемной теплоемкости основано на измерениях плотности и массовой удельной теплоемкости, причем измерения последней представляют собой весьма трудную задачу. Однако эти результаты показывают, что объемная удельная теплоемкость бетона мало зависит от температуры, за исключением лишь пика при температурах около 100 °С вследствие эндотермических реакций<sup>1</sup>.

Молярная теплоемкость основных компонентов цемента может быть оценена с помощью эмпирических формул [3.1]:

$$\begin{aligned} \text{CaO} : C_p &= 11,67 + 1,08 \cdot 10^{-3} T - 1,56 \cdot 10^5 T^{-2}; \\ \text{SiO}_2 : C_p &= 11,22 + 8,2 \cdot 10^{-3} T - 2,7 \cdot 10^5 T^{-2}; \\ \text{H}_2\text{O} : C_p &= 6,49 + 6,6 \cdot 10^{-3} T - 0,91 \cdot 10^5 T^{-2}; \\ \text{C}_{1,62} \text{SH}_{1,5} : C_p &= 39,86 + 19,85 \cdot 10^{-3} T - 6,59 \cdot 10^5 T^{-2}, \end{aligned} \quad (3.26)$$

где  $C_p$  выражается в кал/(моль·°С).

Поскольку химический состав цемента является функцией времени и температуры, эти данные следует вводить в модель, учитывающую неустойчивость указанных химических компонентов:

молярная теплоемкость  $C_p$  связана с энтальпией  $H$  и температурой  $T$  соотношением

$$C_p = (\partial H / \partial T)_p; \quad (3.27)$$

если в реакцию вступила лишь часть  $\xi$  химического компонента, то энтальпия является функцией  $T$  и величины  $\xi$ :

$$dH_p = (\partial H / \partial T)_{p, \xi} dT + (\partial H / \partial \xi)_{p, T} d\xi; \quad (3.28)$$

и

$$(\partial H / \partial T)_{p, \xi} = C_{p, \xi}; \quad (3.29)$$

$$(\partial H / \partial T)_{p, T} = \Delta H_{p, T}, \quad (3.30)$$

<sup>1</sup> И пика при температурах 450—550 °С вследствие дегидратации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . (Примеч. науч. ред.)

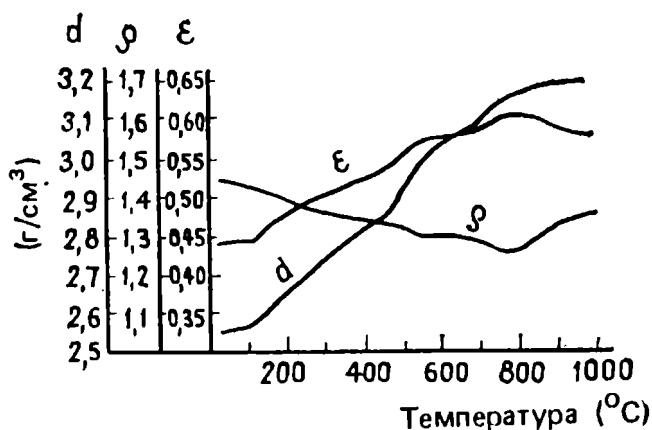


РИС. 3.22

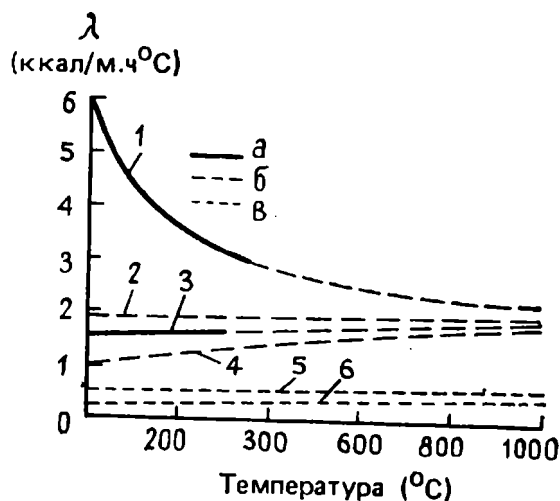
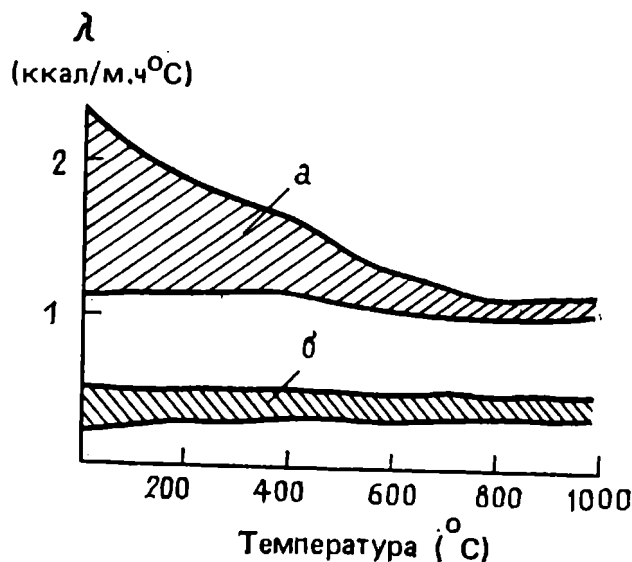


РИС. 3.23

1 — кварц; 2 — диабаз; 3 — анортит; 4 — вулканическое стекло (1—4 — обычные бетоны); 5 — вспученный заполнитель плотностью 1,45 г/см³; 6 — вспученный заполнитель плотностью 1,15 г/см³ (5—6 — легкие бетоны); а — экспериментальные значения; б — предполагаемые значения; в — вычисленные значения

РИС. 3.24

а — обычные бетоны; б — легкие бетоны

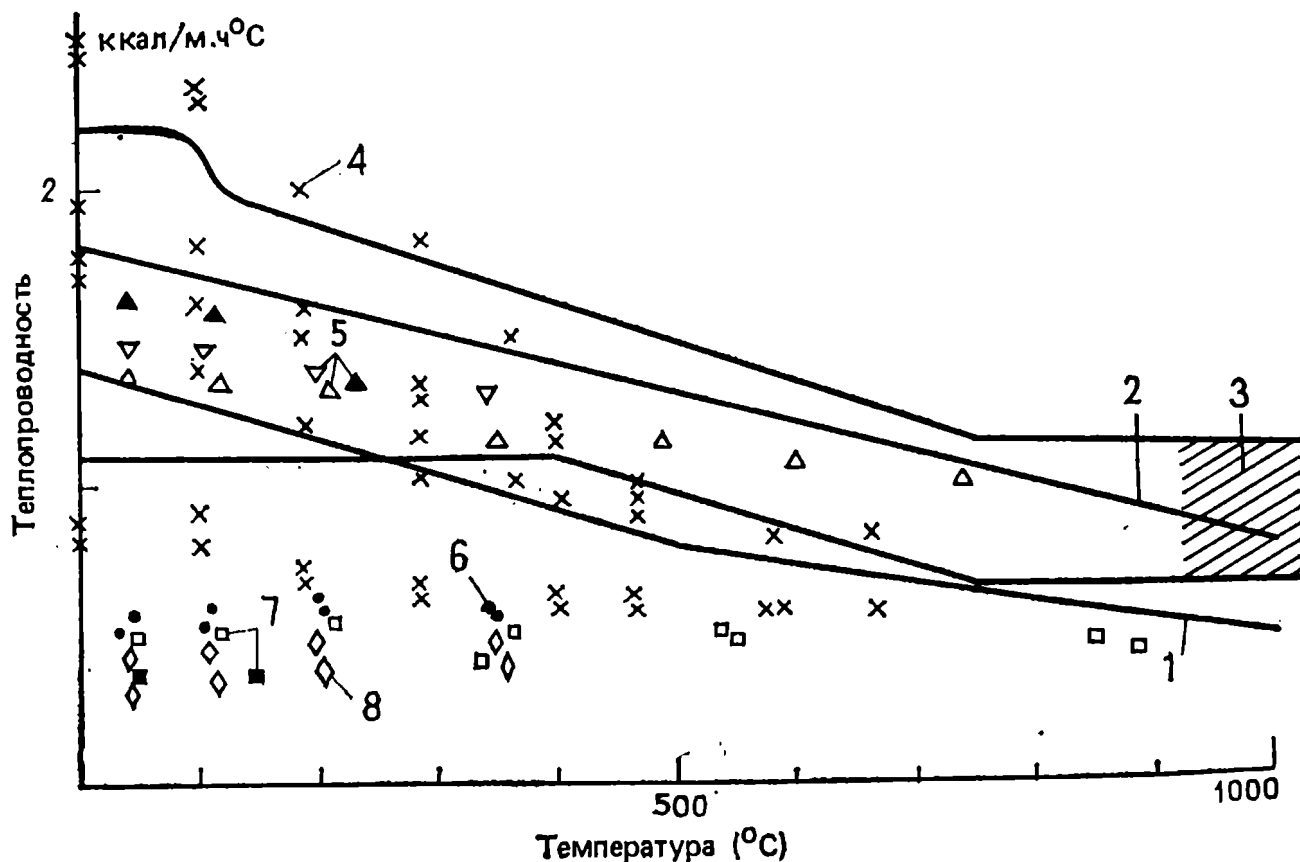


РИС. 3.25. СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БЕТОНА ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

1 — кривая, рекомендованная в [3.8]; 2 — по работе [3.10]; 3 — зона данных, приведенных в [3.10]; 4 — по работе [3.18]; 5 — бетоны на гравийных заполнителях [3.1]; 6 — бетон на вспученном шлаке [3.1]; 7 — бетон на вспученном сланце [3.1]; 8 — бетон с пемзовым заполнителем [3.1]

откуда получим

$$C_p = C_{p, \xi} + (d\xi/dT)_p \Delta H_{p, T}. \quad (3.31)$$

В правой части этого выражения первый член представляет собой теплоемкость негидратированной части цемента, а второй — теплоемкость продуктов реакции.

Если применить это соотношение к схеме дегидратации, приведенной в разд. 3.2.1, то получим

$$C_p^* = (1 - \xi) C_p^* + 0,62\xi (C_p)_{C,S} + 0,38\xi (C_p)_{CS} + \\ + \frac{d\xi}{dT} [-H^* + 0,62H_{C,S} + 0,38H_{CS} + 1,5H_H]; \quad (3.32)$$

$$(C_p)_{CH} = (1 - \xi') (C_p)_{CH} + \xi' (C_p)_C + (d\xi/dT) [-H_{CH} + H_C + H_H]. \quad (3.33)$$

В первой из этих формул  $C_p^*$  и  $H^*$  представляют собой соответственно молярную теплоемкость и энтальпию группы  $C_{1,62}SH_{1,5}$ .

Энтальпию, входящую в эти формулы, можно оценить с помощью графиков, приведенных на рис. 3.26.

Тогда молярная теплоемкость раствора определится из выражения

$$C_p = \frac{x^* C_p^* + x_{CH} (C_p)_{CH} + x_{C,S} (C_p)_{C,S} + x_{C,S} (C_p)_{C,S}}{x^* M^* + x_{CH} M_{CH} + x_{C,S} M_{C,S} + x_{C,S} M_{C,S}}, \quad (3.34)$$

где  $C_p$ ,  $M$  и  $x$  — соответственно молярная теплоемкость, молярная масса и молярная функция каждого компонента.

Молярные теплоемкости групп  $C_{1,62}SH_{1,5}$ ,  $C_3S$ ,  $\beta$ - $C_2S$  и  $CH$  приведены на рис. 3.27 [3.1].

Остается оценить массовую теплоемкость заполнителей: на рис. 3.28 этот параметр приведен для трех широко распространенных видов заполнителя [3.1].

Наконец, можно вывести выражение объемной теплоемкости бетона

$$C_p \rho = v_c (C_p)_c \rho_c + \sum_i v_{a_i} (C_p)_{a_i} \rho_{a_i} + \\ + \varphi \rho_{\text{вода}} (1 - \xi_{\text{вода}}) (C_p)_{\text{вода}} + \\ + \varphi \rho_{\text{вода}} \frac{d\xi_{\text{вода}}}{dT} Q. \quad (3.35)$$

Правая часть этого выражения содержит четыре члена, первый из которых характеризует долю цементного камня, второй — долю разных заполнителей, а третий и четвертый — долю химически несвязанной воды, характеризуемой относительным содержанием по объему  $\varphi$ ,  $\text{см}^3/\text{см}^3$ , испаряемой пропорционально величине  $\xi_{\text{вода}}$ , и скрытой теплотой парообразования  $Q$ , кал/моль.

**3.3.2.3. Температурные деформации.** В отличие от рассмотренных выше свойств коэффициент температурных деформаций увеличивается с ростом температуры, несмотря на то что испарение свободной воды вызывает обратный эффект.

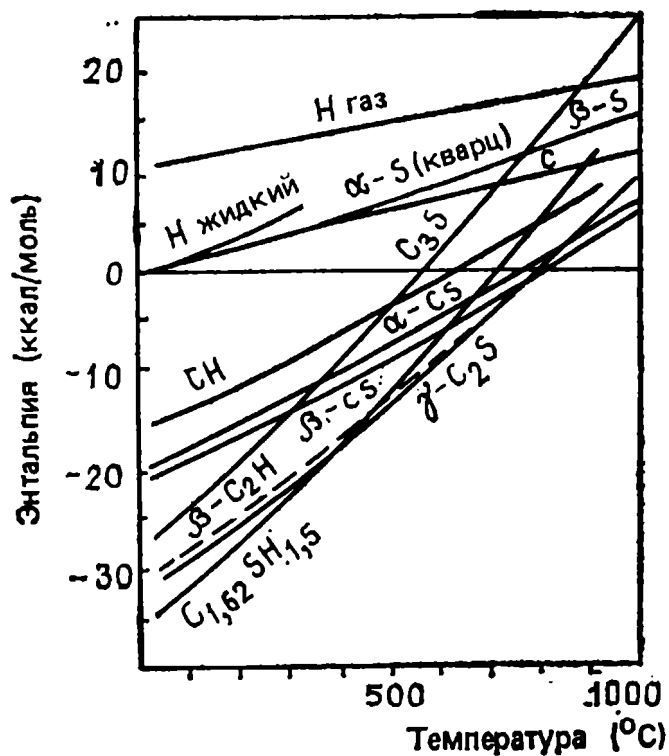


РИС. 3.26

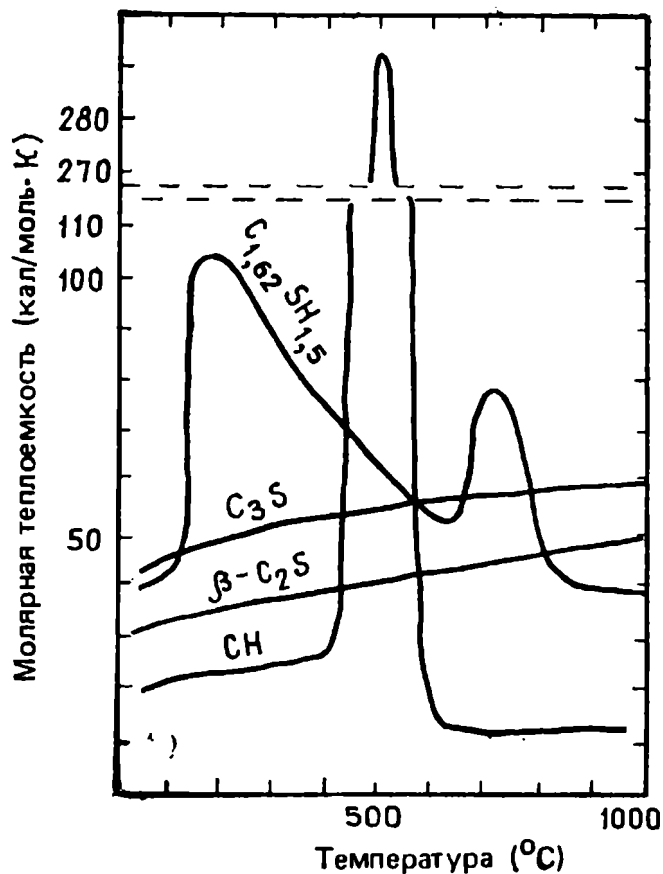


РИС. 3.27

РИС. 3.28

1 — кварц; 2 — анортит; 3 — сланец

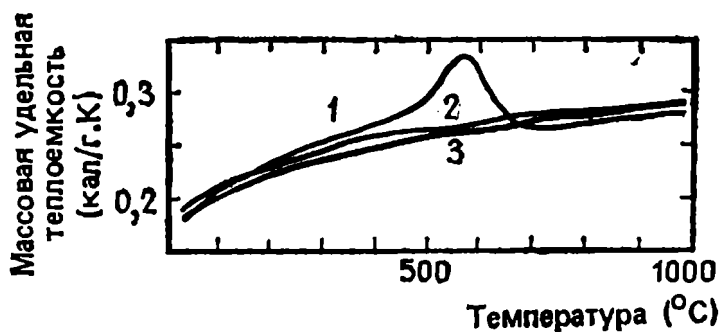
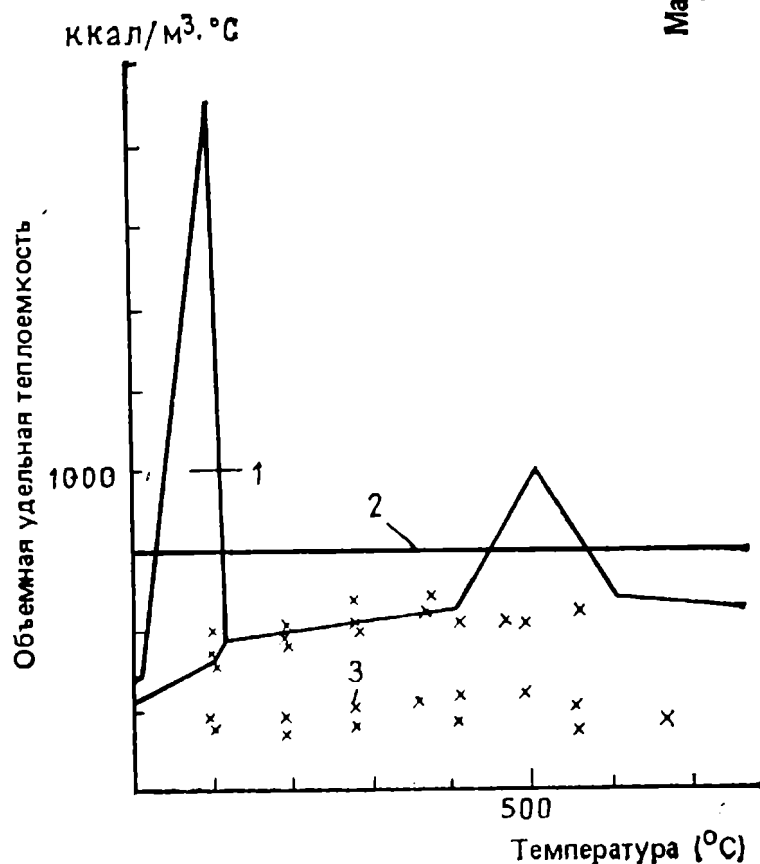
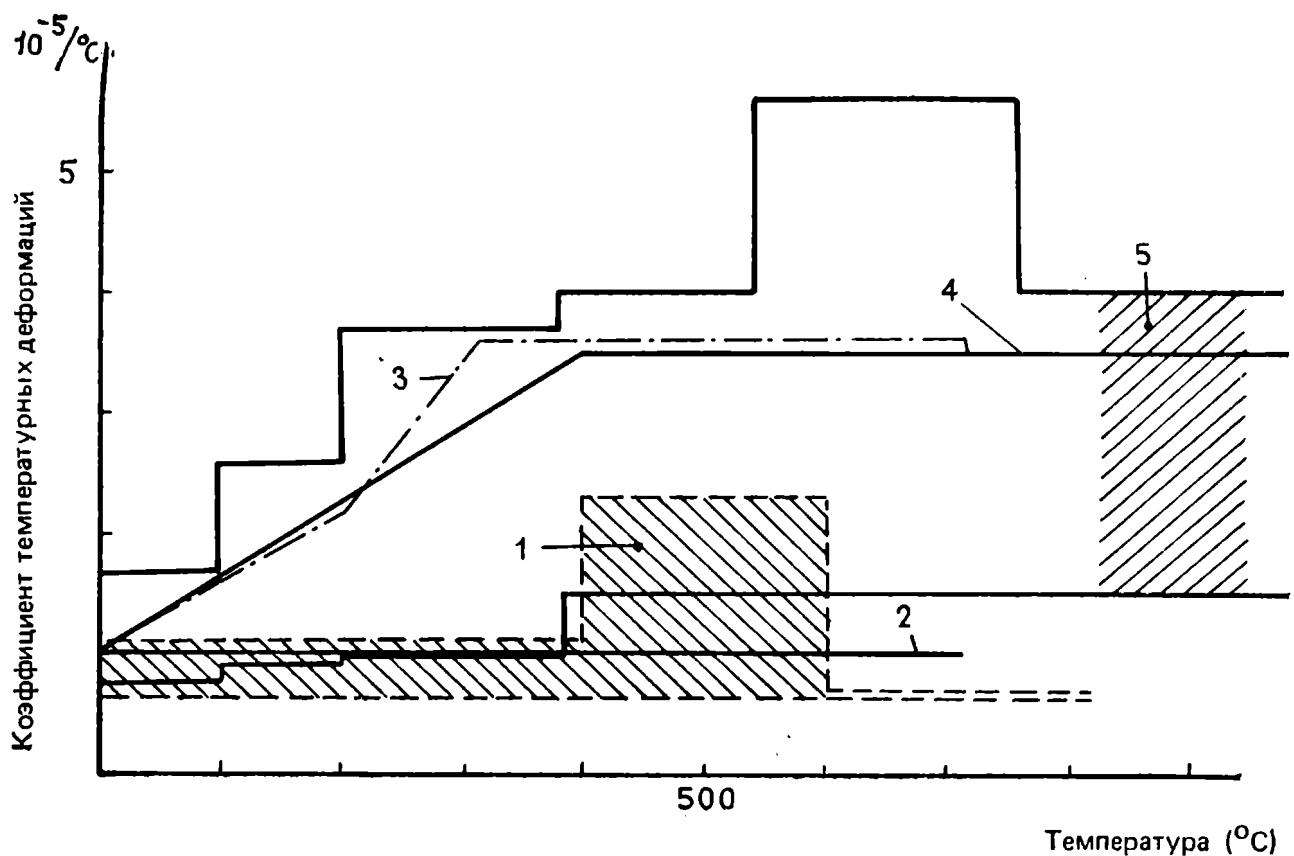


РИС. 3.29. СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЪЕМНОЙ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМОСТИ БЕТОНА ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ 1 — зона данных, приведенных в [3.8]; 2 — кривая, рекомендованная в [3.8]; 3 — по боте [3.8]

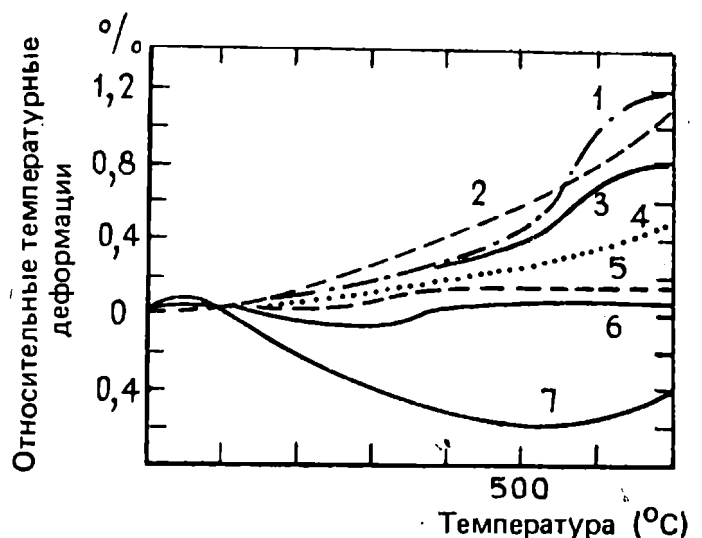


**РИС. 3.30. СОПОСТАВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФИЦИЕНТА ТЕМПЕРАТУРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ БЕТОНА ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ**

1 — зона данных, приведенных в [3.8];  
2 — кривая, рекомендованная в [3.8];  
3 — по работе [3.16]; 4 — по работе [3.10];  
5 — зона данных, приведенных в [3.10]

**РИС. 3.31**

1 — песчаник; 2 — известняк; 3 — гранит;  
4 — сланец; 5 — вспученный шлак; 6 —  
пемза; 7 — перлит



Результаты проведенных испытаний также весьма разнородны (рис. 3.30), в связи с чем выбор подходящей кривой представляет собой достаточно деликатную задачу. Кроме того, природа заполнителей, как видно из рис. 3.31, играет здесь определяющую роль. На этом графике представлены относительные деформации (относительно длины при 0 °C) при увеличении температуры для семи различных заполнителей.

#### **3.4. ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АРМАТУРЫ ДЛЯ ОБЫЧНОГО И ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ**

В гл. 4 приводятся данные о влиянии температуры на механические и теплофизические свойства малоуглеродистых строительных сталей, которые, очевидно, отличаются от сталей, применяемых в каче-

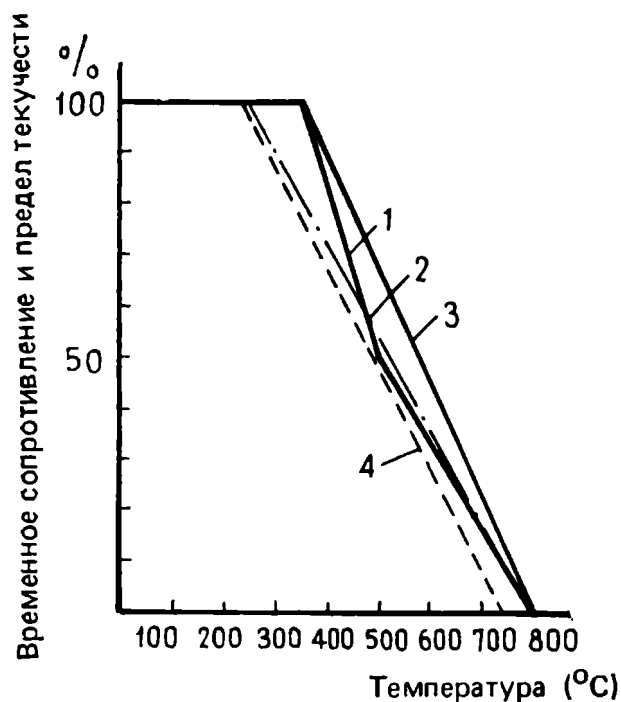


РИС. 3.32

1 — арматура круглого профиля FcE22 или FcE24; 2 — сварная сетка; 3 — арматурные стержни периодического профиля (1, 2), 3 — временное сопротивление; 4 — предел текучести

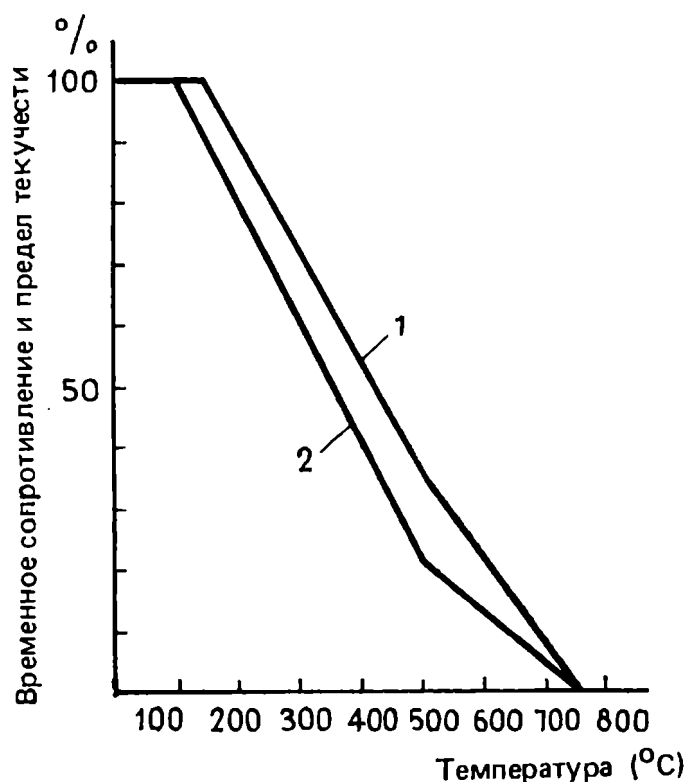


РИС. 3.33. ИЗМЕНЕНИЯ ВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И УСЛОВНОГО ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ ПРИ ОТНОСИТЕЛЬНОМ УДЛИНЕНИИ 0,2% гладких (1) и прядевых (2) канаты

стве арматуры обычного и преднапряженного железобетона. В отсутствие точных и исчерпывающих данных по этому вопросу мы рекомендуем пользоваться указаниями [3.8].

**3.4.1. Стали для арматуры железобетона.** Изменения временного сопротивления и предела текучести арматурных сталей приведены на рис. 3.32. Коэффициент температурного расширения является постоянным и равным  $\Delta l/l = 1,5 \cdot 10^{-5}$ \* на  $1^\circ\text{C}$ .

**3.4.2. Стали для напрягаемой арматуры.** Изменения временного сопротивления и условного предела текучести (при относительном удлинении 0,2%) приведены на рис. 3.33. Коэффициент температурного расширения принимается постоянным и также равным  $\Delta l/l = 1,5 \cdot 10^{-5}$  на  $1^\circ\text{C}$ .

### 3.5. НАГРЕВ БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Температуры, достигаемые в конструктивном элементе при воздействии пожара известной интенсивности, можно определить тремя способами: точным расчетом, учитывающим по возможности все происходящие в элементе температурные изменения; упрощенным расчетом, основанным на сопоставлении с экспериментальными данными; экспериментальным путем.

Для бетона первый способ является иллюзорным, так как в расчете необходимо учитывать многочисленные происходящие в бетоне фи-

\* Только для легированных сталей; для обычных  $11 \cdot 10^{-6}$  на  $1^\circ\text{C}$ . (Примеч. науч. ред.)

зические и химические явления и, в частности, фильтрацию влаги. Поэтому существующие методы расчета принадлежат ко второму способу и представляют собой хорошо развитые численные методы (например, методы конечных или трехмерных элементов), предусматривающие обязательное применение ЭВМ. В данной работе они не рассмотрены подробно, так как при необходимости читатель может обратиться к первоисточникам [3.10, 3.19, 3.20].

Остается лишь одно решение — экспериментальный способ, дополняемый в необходимых случаях систематическим расчетом указанного типа. Поэтому ниже приведены только основные результаты испытаний и расчетов, которые в настоящее время имеются в нашем распоряжении. С помощью интерполяции и аналогии читатель сможет использовать их для решения своих конкретных задач.

### 3.5.1. Незащищенные элементы.

**3.5.1.1. Распределение температур в колоннах.** Применение метода расчета, предложенного в [3.19], дает результаты, приведенные в табл. 3.4—3.6.

В табл. 3.4 первая цифра соответствует толщине бетонного элемента 18 см, а вторая — толщине 50 см. Для определения средней температуры промежуточных толщин бетонного элемента используют линейную интерполяцию (для данного расстояния  $u$  от поверхности). Линейную интерполяцию применяют также и для определения температур, соответствующих промежуточным расстояниям между указанными в таблице. Наконец, распределение температуры вдоль контура элемента не является равномерным.

Принимается параболическое отклонение от значений (рис. 3.34), приведенных в табл. 3.5, поэтому для углов получаем поправочный коэффициент 1,2, а для средних частей сторон колонны — 0,9.

Кроме того, в табл. 3.5 даны средние температуры для некоторых колонн, подверженных действию огня со всех четырех сторон в течение 30, 60, 90, 120 и 180 мин.

Наконец, может оказаться полезным знать температуры в центре колонны. Некоторые значения приведены в табл. 3.6 при длительности воздействия огня 30, 60, 90 и 120 мин [3.8].

**3.5.1.2. Распределение температур в балках.** Использование метода расчета, изложенного в [3.19], в отдельных частных случаях дает результаты, приведенные в табл. 3.7, в которой представлено распре-

Т а б л и ц а 3.4

**Средние температуры бетона (и арматуры) в колоннах на расстоянии  $u$  от поверхности в зависимости от длительности воздействия огня**

| $u$ , см | Температура, °С, при времени, мин |         |         |         |
|----------|-----------------------------------|---------|---------|---------|
|          | 30                                | 60      | 90      | 120     |
| 1,5      | 410—350                           | 600—550 | 700—660 | 770—730 |
| 3        | 280—240                           | 490—430 | 610—540 | 690—620 |
| 4,5      | 120—90                            | 340—300 | 480—410 | 580—550 |

Таблица 3.5

| Размеры, см | Температура, °С, при времени, мин |     |     |     |     |
|-------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|             | 30                                | 60  | 90  | 120 | 180 |
| 16×16       | 340                               | 530 |     |     |     |
| 12×60       | 300                               | 500 |     |     |     |
| 20×20       |                                   | 480 | 590 |     |     |
| 18×30       | 230                               | 420 | 560 | 660 | 780 |
| 16×80       | }                                 |     |     |     |     |
| 24×24       |                                   |     | 550 | 620 | 750 |
| 18×60       |                                   |     | 505 | 600 | 730 |
| 18×100      | 200                               | 370 | 480 | 580 | 710 |
| 30×30       | 180                               | 320 | 450 | 530 | 670 |
| 20×100      | 180                               | 320 | 450 | 530 | 670 |
| 22×100      | 170                               | 300 | 410 | 500 | 630 |
| 30×48       | }                                 |     |     |     |     |
| 36×36       |                                   | 280 | 390 | 470 | 595 |
| 24×120      |                                   |     |     |     |     |
| 30×60       | 140                               | 260 | 325 | 420 | 580 |
| 26×30       | 140                               | 260 | 325 | 420 | 580 |
| 30×100      | 120                               | 230 | 330 | 410 | 550 |
| 42×42       | 120                               | 230 | 330 | 410 | 550 |
| 28×140      | 105                               | 215 | 300 | 380 | 510 |
| 30×150      | 100                               | 190 | 280 | 360 | 480 |
| 48×48       | 100                               | 190 | 270 | 350 | 470 |
| 48×60       | 95                                | 180 | 250 | 320 | 430 |
| 36×180      | 90                                | 170 | 240 | 300 | 405 |
| 48×100      | 90                                | 170 | 240 | 300 | 405 |

деление температур только в левой половине балки ввиду симметрии ее поперечного сечения (рис. 3.35).

Такие температуры обычно имеют место в большей части пролета балок, несколько снижаясь вблизи опор. Допускается 10%-ное снижение температуры на опоре [3.10], причем сопряжение с температурой в остальной части пролета балки осуществляется по линейному закону на длине, равной удвоенной высоте пяты.

Приведенные выше указания можно дополнить изотермами, полученными экспериментальным путем [3.21]. В качестве примеров такие изотермы приведены на рис. 3.36—3.39.

Таблица 3.6

| Размеры, см | Температура, °С, при времени, мин |     |     |     |
|-------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|
|             | 30                                | 60  | 90  | 120 |
| 18×30       | 30                                | 150 | 300 | 400 |
| 18×60       |                                   |     |     |     |
| 18×100      |                                   |     |     |     |
| 30×30       | 0                                 | 30  | 100 | 140 |
| 30×60       | 0                                 | 15  | 60  | 110 |
| 30×100      |                                   |     |     |     |
| 48×30       | 0                                 | 15  | 50  | 100 |
| 48×60       | 0                                 | 0   | 0   | 10  |
| 48×100      |                                   |     |     |     |

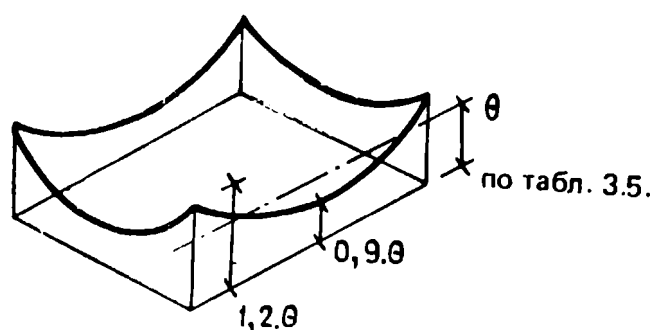


РИС. 3.34

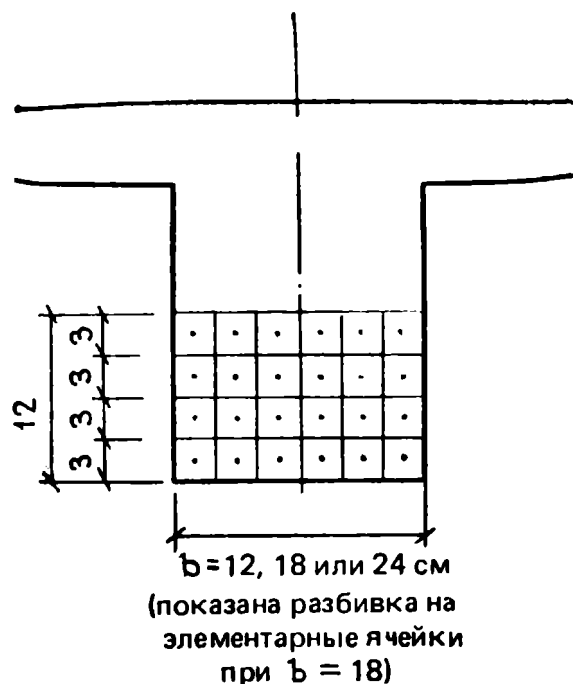


РИС. 3.35

Следует отметить, что обычно эти температуры не обеспечивают необходимого запаса, ибо испытания были проведены примерно через три месяца после укладки бетонной смеси, когда избыточная вода затворения еще не полностью испарилась.

**3.5.1.3. Распределение температур в стеновых элементах.** Применение метода, изложенного в [3.19], к некоторым частным случаям позволило получить данные, приведенные в табл. 3.8, где представлены

Таблица 3.7

| Время,<br>мин | Температура, °С, при $b$ , см |     |     |     |     |     |     |     |
|---------------|-------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|               | 12                            |     | 18  |     |     | 24  |     |     |
| 30            | 350                           | 140 | 350 | 110 | 30  | 350 | 110 | 25  |
|               | 370                           | 160 | 360 | 130 | 50  | 360 | 130 | 50  |
|               | 420                           | 230 | 410 | 210 | 140 | 410 | 210 | 130 |
|               | 550                           | 430 | 550 | 410 | 360 | 550 | 410 | 360 |
| 60            | 600                           | 420 | 660 | 320 | 200 | 560 | 310 | 160 |
|               | 630                           | 470 | 590 | 370 | 260 | 590 | 360 | 230 |
|               | 690                           | 560 | 660 | 480 | 390 | 650 | 470 | 360 |
|               | 780                           | 710 | 760 | 660 | 610 | 760 | 650 | 590 |
| 90            | 740                           | 610 | 680 | 470 | 360 | 670 | 440 | 280 |
|               | 760                           | 650 | 710 | 530 | 430 | 700 | 500 | 370 |
|               | 810                           | 720 | 770 | 630 | 550 | 760 | 610 | 500 |
|               | 880                           | 820 | 850 | 770 | 730 | 850 | 760 | 705 |
| 120           | 820                           | 720 | 760 | 580 | 490 | 740 | 540 | 400 |
|               | 840                           | 760 | 790 | 640 | 560 | 780 | 600 | 480 |
|               | 880                           | 810 | 840 | 720 | 670 | 830 | 700 | 610 |
|               | 940                           | 890 | 920 | 850 | 820 | 910 | 830 | 780 |

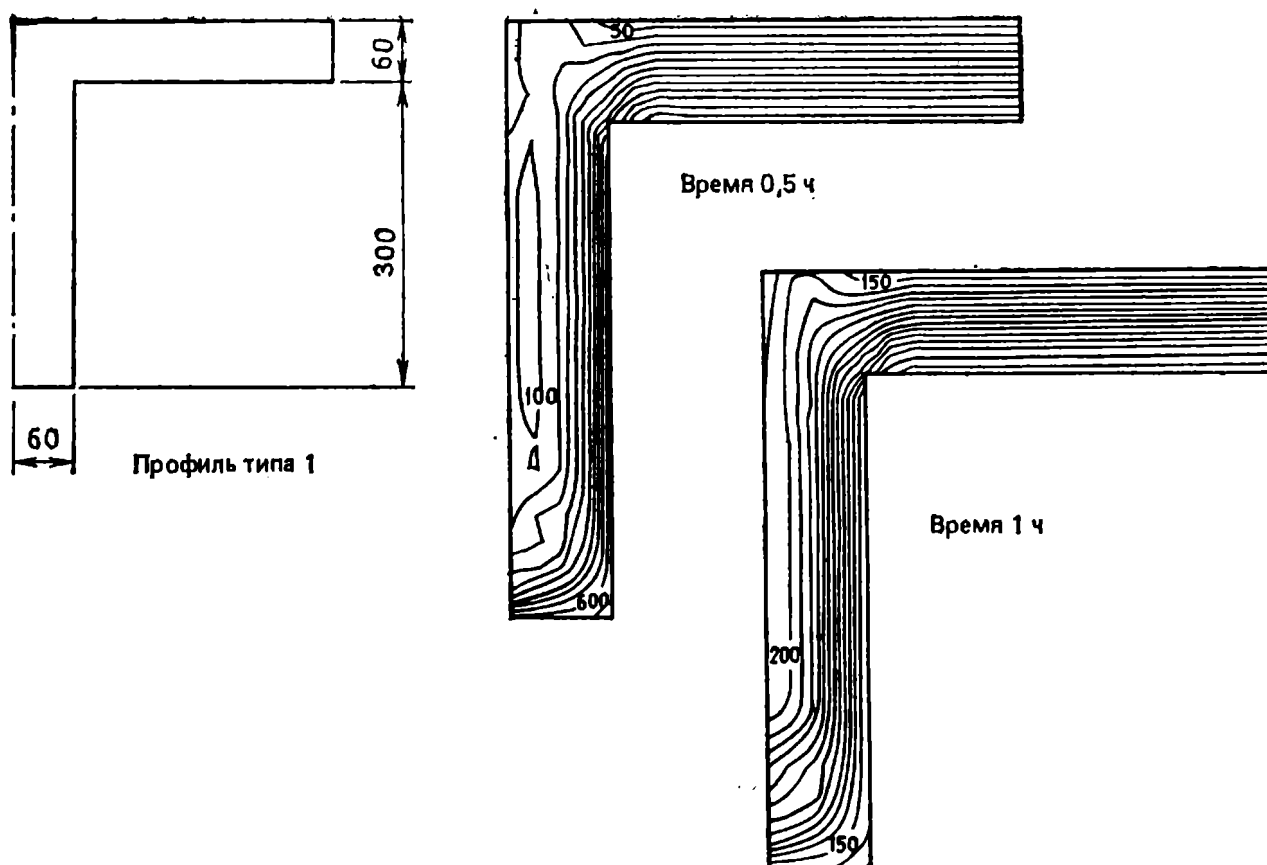


РИС. 3.36

температуры в бетоне на расстоянии  $u$  от обращенной к огню поверхности элемента.

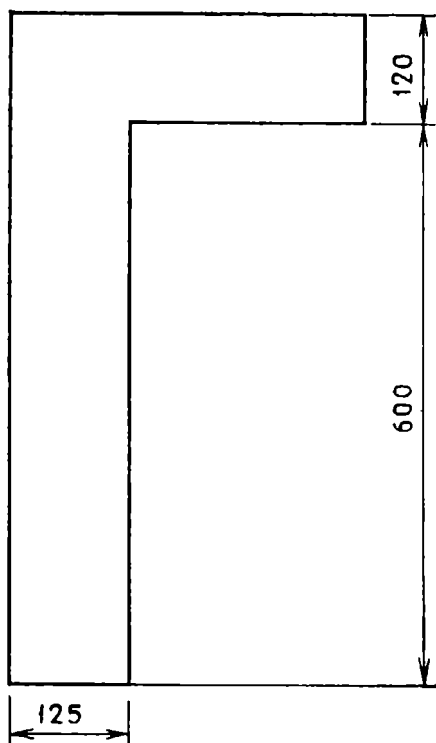
Кроме того, этот метод позволяет получить значения средних температур в бетонных элементах разной толщины при различной длительности воздействия огня. Соответствующие данные приведены в табл. 3.9 [3.8], где  $a$  — толщина пластины.

**3.5.1.4. Плиты перекрытий.** На основе данных, полученных при применении того же метода [3.19], составлена табл. 3.10 для нескольких значений длительности воздействия огня. В таблице приведены температуры, достигаемые на расстоянии  $u$  от обращенной к огню поверхности бетона в плитах толщиной  $h$ , равной 8 и 40 см.

С другой стороны, на рис. 3.40 приведены средние температуры в бетоне в зависимости от длительности воздействия огня и толщины плит [3.8].

Таблица 3.8

| $u$ , см | Нагрев          | Температура, °С, при длительности нагрева, ч |     |     |     |     |
|----------|-----------------|----------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|          |                 | 0,5                                          | 1   | 1,5 | 2   | 3   |
| 4,5      | С двух сторон   | 100                                          | 270 | 400 | 500 |     |
| 3        |                 | 225                                          | 405 | 520 | 600 |     |
| 1,5      |                 | 340                                          | 540 | 640 | 700 |     |
| 4,5      | С одной стороны | 100                                          | 270 | 400 | 475 | 570 |
| 3        |                 | 225                                          | 405 | 520 | 590 | 680 |
| 1,5      |                 | 340                                          | 540 | 640 | 700 | 785 |



Профиль типа 4

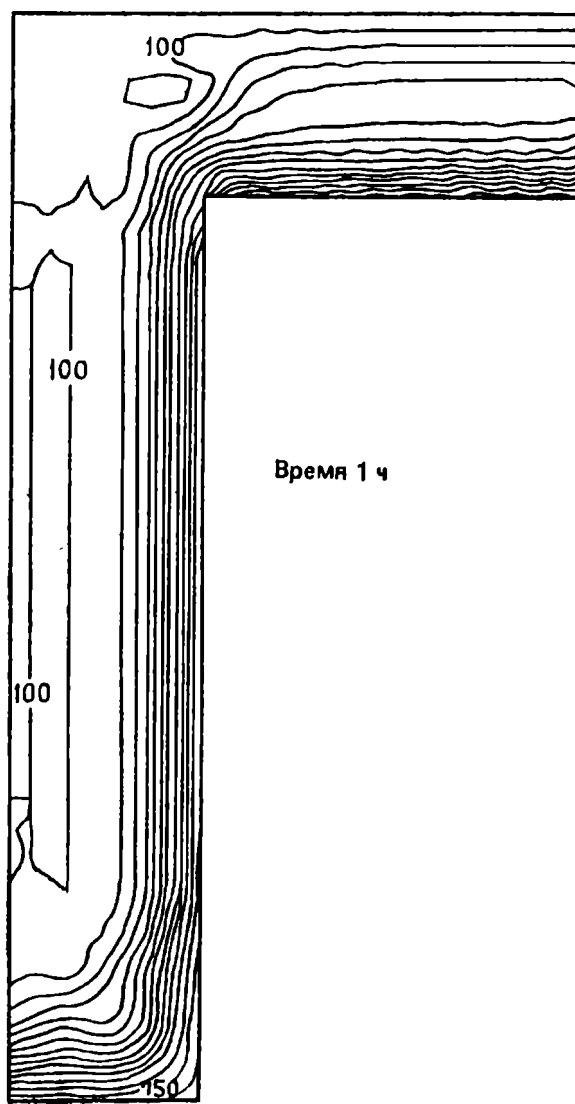
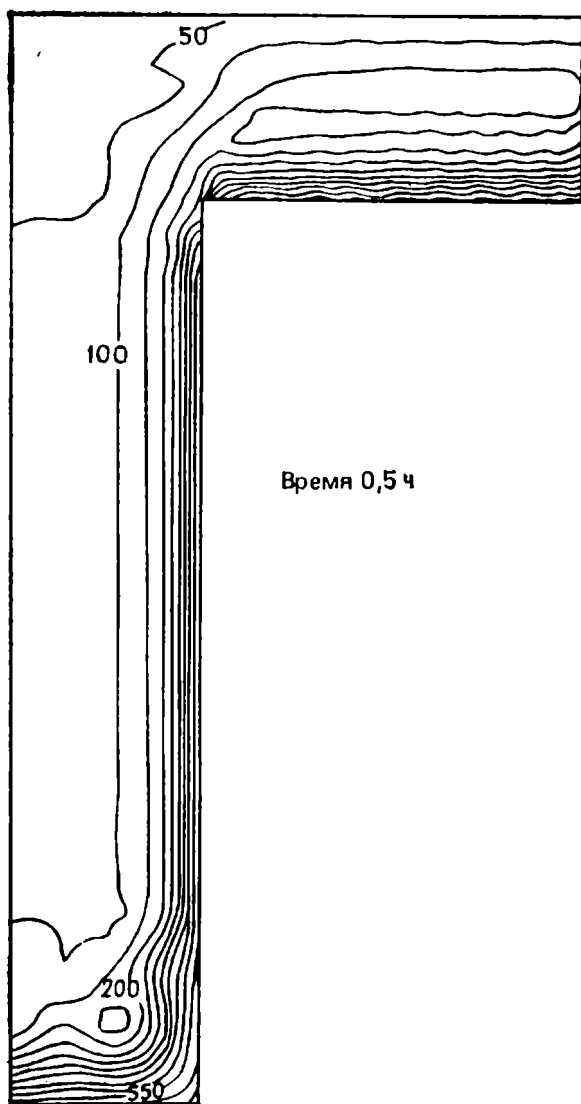


РИС. 3.37

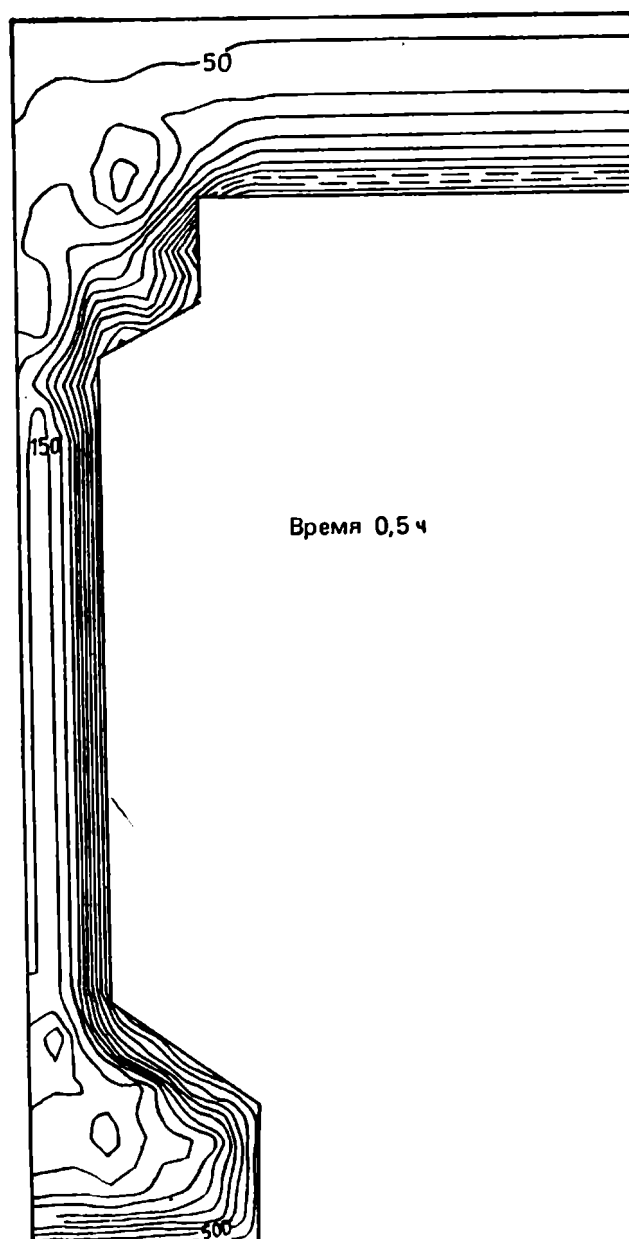
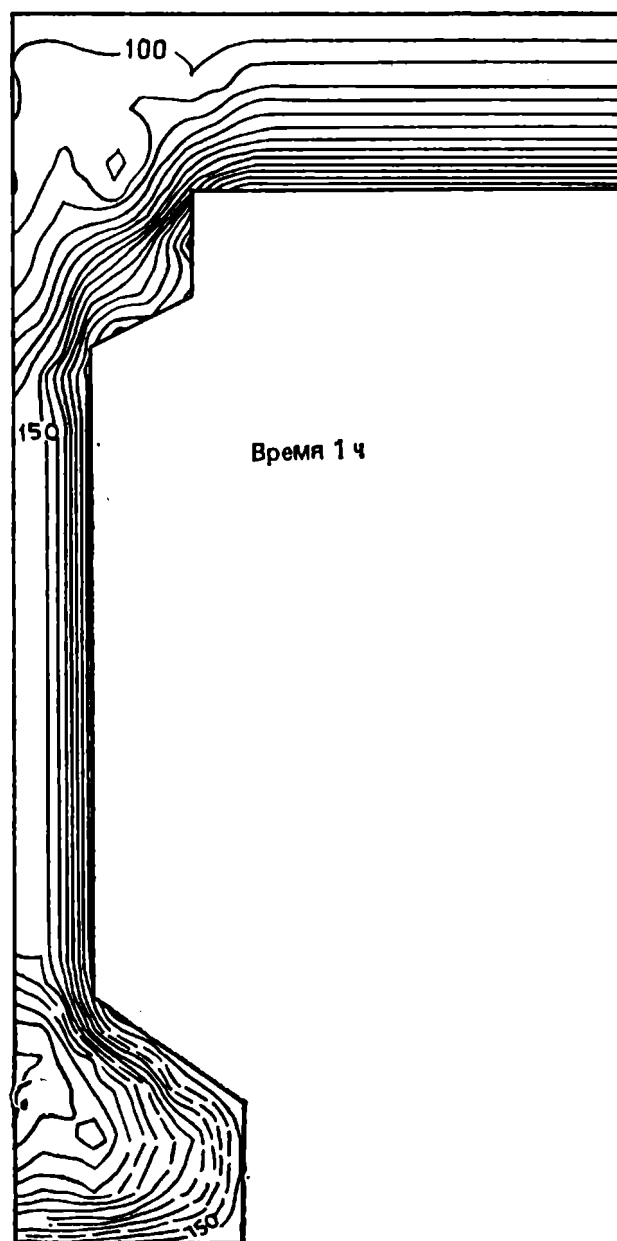
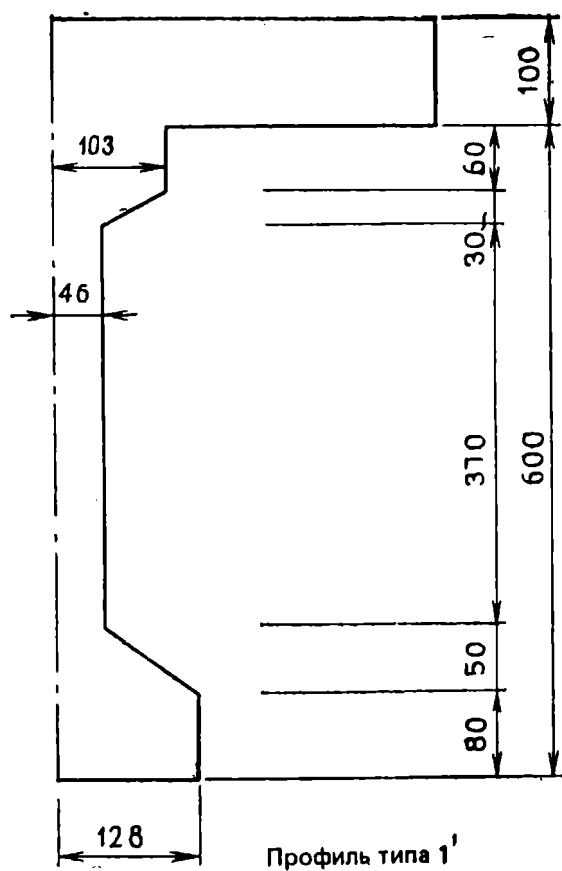


РИС. 3.38

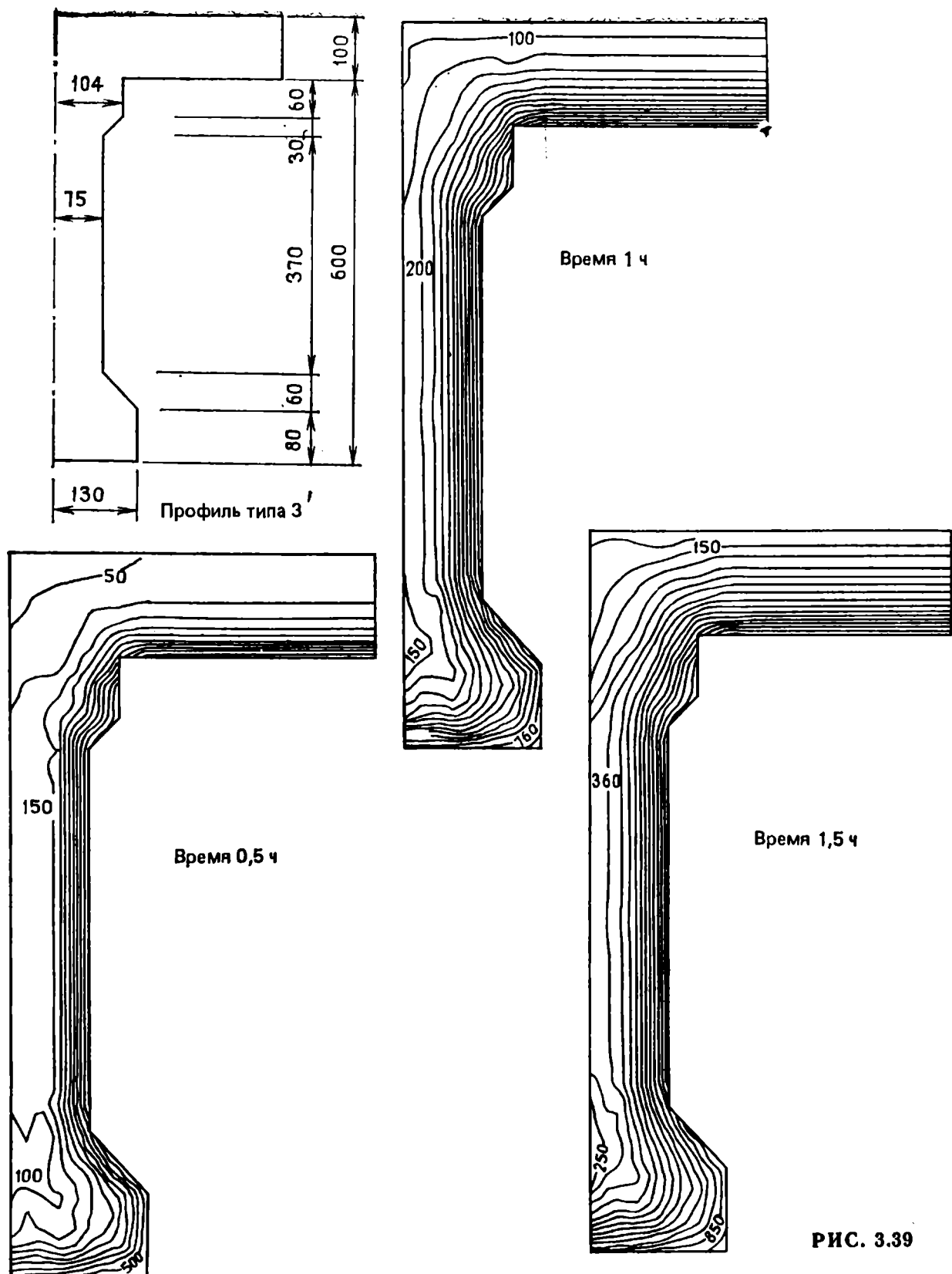


РИС. 3.39

**3.5.2. Защищенные элементы.** Хотя арматура обычного железобетона и напрягаемая арматура преднапряженного железобетона защищаются слоем бетона, он, как правило, оказывается недостаточным для обеспечения длительного предела огнестойкости, в связи с чем необходимо устраивать дополнительную защиту.

Для этой цели обычно применяют материалы, наносимые на готовую конструкцию после ее установки в проектное положение и обладающие повышенной удобоукладываемостью. Гипс, вермикулит, минеральные волокнистые материалы и т. п. используют также и для за-

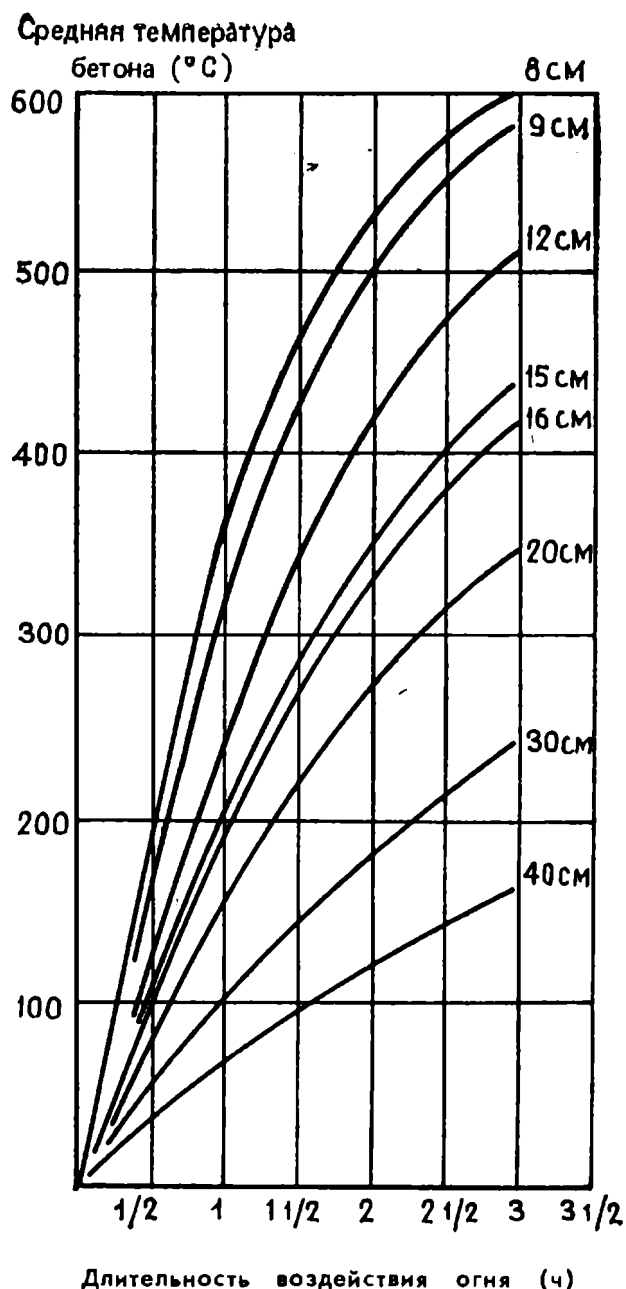


РИС. 3.40

ше, чем гипса, который к тому же обладает и меньшей теплопроводностью. Так, в слое бетона толщиной 5 см аккумулируется в 20 раз больше тепла, чем в слое специального гипса толщиной 1 см (гипс с вермикулитом), но тот же слой бетона пропускает вдвое больше тепла, чем слой гипса [3.21].

Т а б л и ц а 3.9

| Длительность<br>воздействия<br>огня, ч | Температура, °С, при нагреве              |          |                                   |     |     |     |
|----------------------------------------|-------------------------------------------|----------|-----------------------------------|-----|-----|-----|
|                                        | с двух сторон (при толщине 18 см и более) |          | с одной стороны                   |     |     |     |
|                                        |                                           |          | средняя при $\alpha$ , равном, см |     |     |     |
|                                        | средняя                                   | в центре | 15                                | 20  | 30  | 45  |
| 0,5                                    | 170                                       | 25       | 100                               | 75  | 50  | 30  |
| 1                                      | 350                                       | 140      | 200                               | 160 | 100 | 70  |
| 1,5                                    | 480                                       | 270      | 280                               | 220 | 275 | 350 |
| 2                                      | 570                                       | 380      | 350                               | 275 | 180 | 120 |
| 3                                      |                                           |          | 440                               | 350 | 250 | 165 |

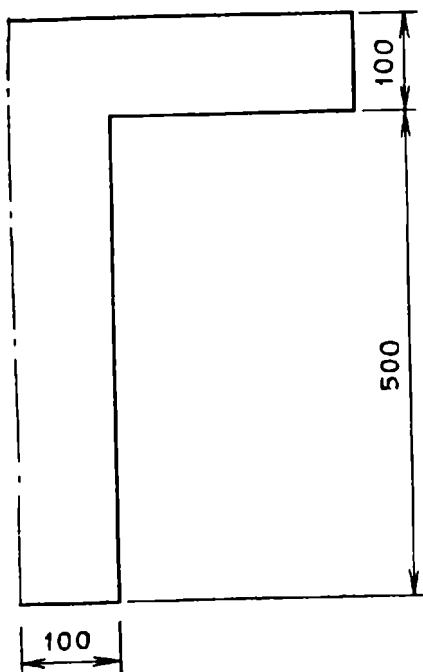
щиты металлических и деревянных конструкций. Подробные сведения о них читатель может найти в гл. 4 (разд. 4.2.1 и прил. 1).

Разумеется, если не существует простого метода расчета нагрева незащищенных элементов, то тем более очень трудно разработать и метод расчета нагрева защищенных элементов конструкций, поэтому мы можем здесь привести лишь фрагментарные сведения, имеющиеся в литературе.

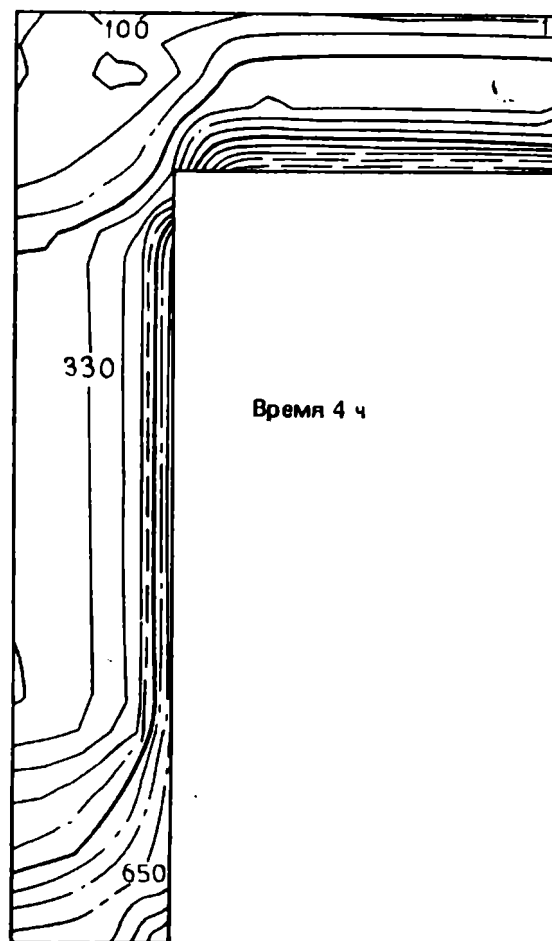
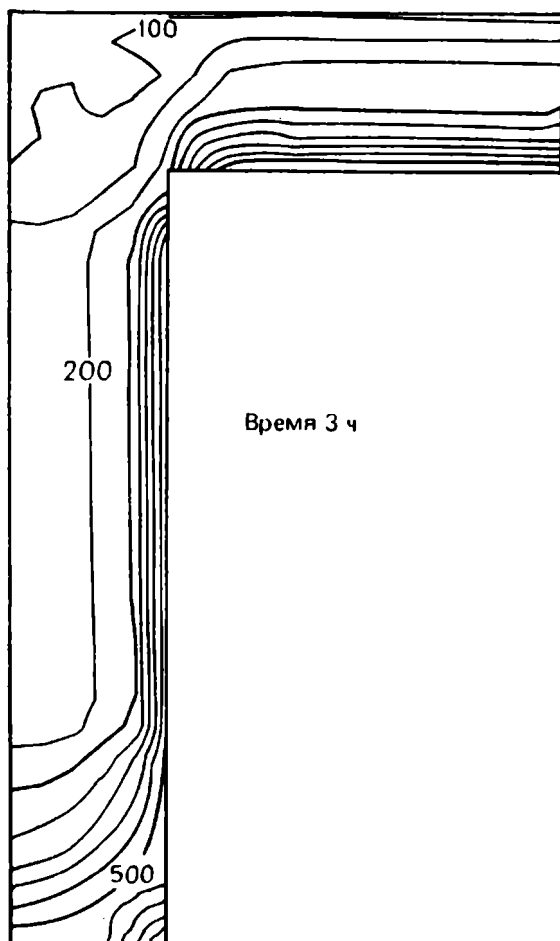
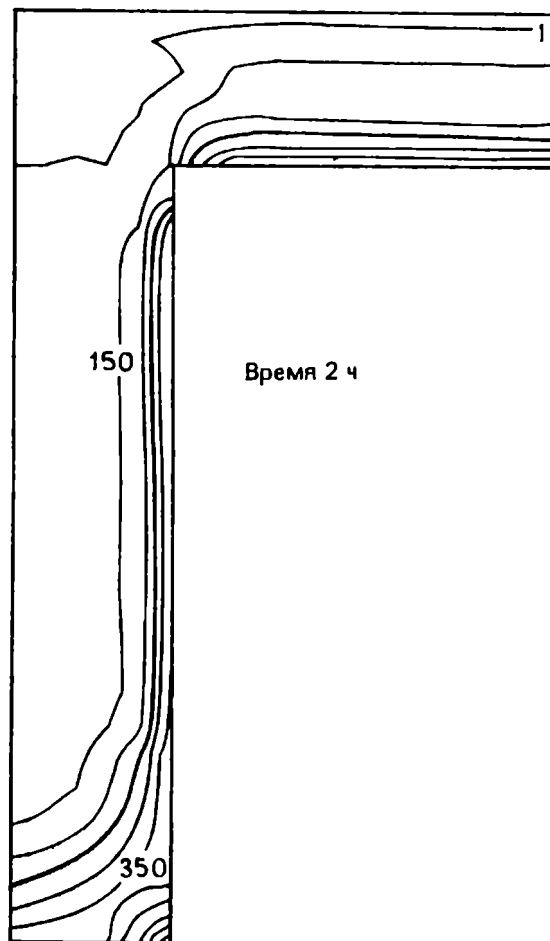
Согласно [3.8], можно свести вопрос к незащищенному элементу и использовать для этого указания разд. 3.5.1, принимая эквивалентные соотношения: 1 см известкового раствора или цемента равен 0,67 см бетона; 1 см вермикулита равен 2,5 см бетона; 1 см асбестоцемента равен 2,5 см бетона; 1 см обычного гипса равен 2,5 см бетона.

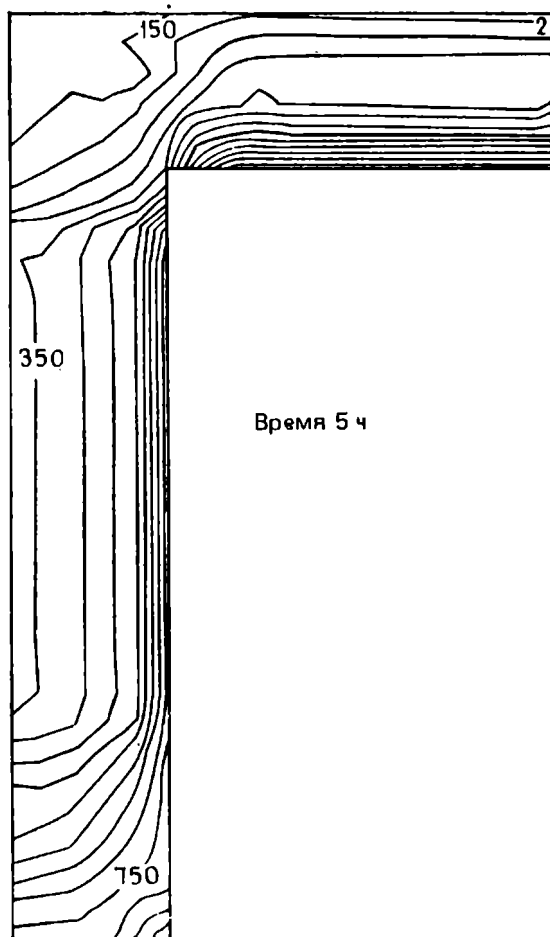
Однако эти соотношения являются достаточно грубыми и действительны практически лишь при малых толщинах (порядка 1 см). С термической точки зрения бетон и, например, гипс выполняют весьма различные функции — теплоемкость бетона значительно вы-



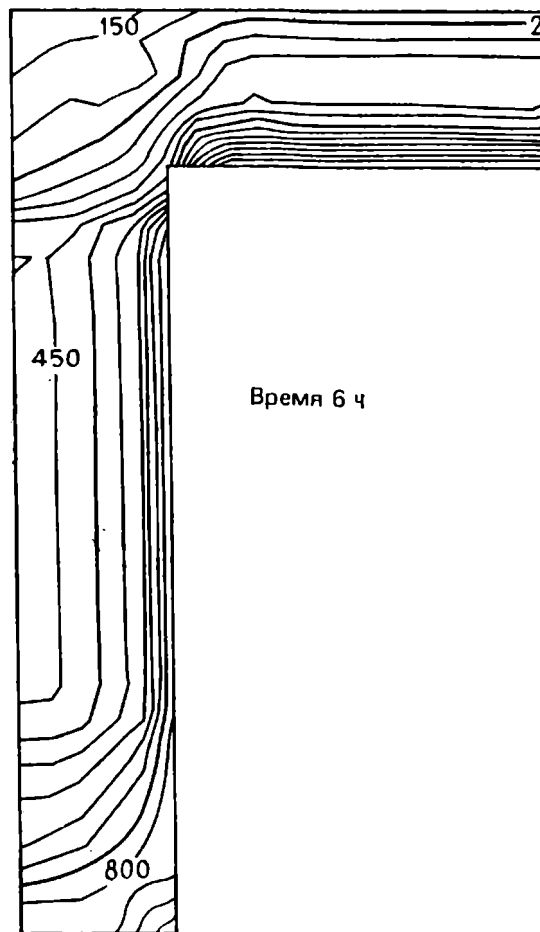


Профиль типа 3  
со слоем гипса 3 см





Время 5 ч



Время 6 ч

РИС. 3.42

В связи с этим в дополнение к экспериментам, описанным в разд. 3.4.1.2, произведены испытания балок, защищенных слоем гипса толщиной 1, 2 и 3 см [3.21]. Полученные результаты приведены на рис. 3.41 и 3.42.

Т а б л и ц а 3.10

| Значения<br>$h$ , см | Значения<br>$u$ , см | Температуры, достигаемые в бетоне при длительности<br>воздействия огня, ч |     |     |     |     |
|----------------------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                      |                      | 0,5                                                                       | 1   | 1,5 | 2   | 3   |
| Любое                | 1,5                  | 340                                                                       | 540 | 640 | 700 | 785 |
|                      | 3                    | 225                                                                       | 405 | 520 | 590 | 680 |
|                      | 4,5                  | 100                                                                       | 270 | 400 | 475 | 570 |
| $\geq 9$             | 7,5                  | 20                                                                        | 140 | 230 | 300 | 400 |
| $\geq 12$            | 10,5                 | 0                                                                         | 50  | 120 | 180 | 270 |
| $\geq 15$            | 13,5                 | 0                                                                         | 20  | 50  | 100 | 180 |

### 3.6. РАСЧЕТ ОГНЕСТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**3.6.1. Основные положения.** Принимая во внимание процесс нагрева, изложенный в гл. 3.5, необходимо проверить утверждение, что несущая способность конструкции остается выше приложенных к ней нагрузок хотя бы в течение установленного нормами периода.

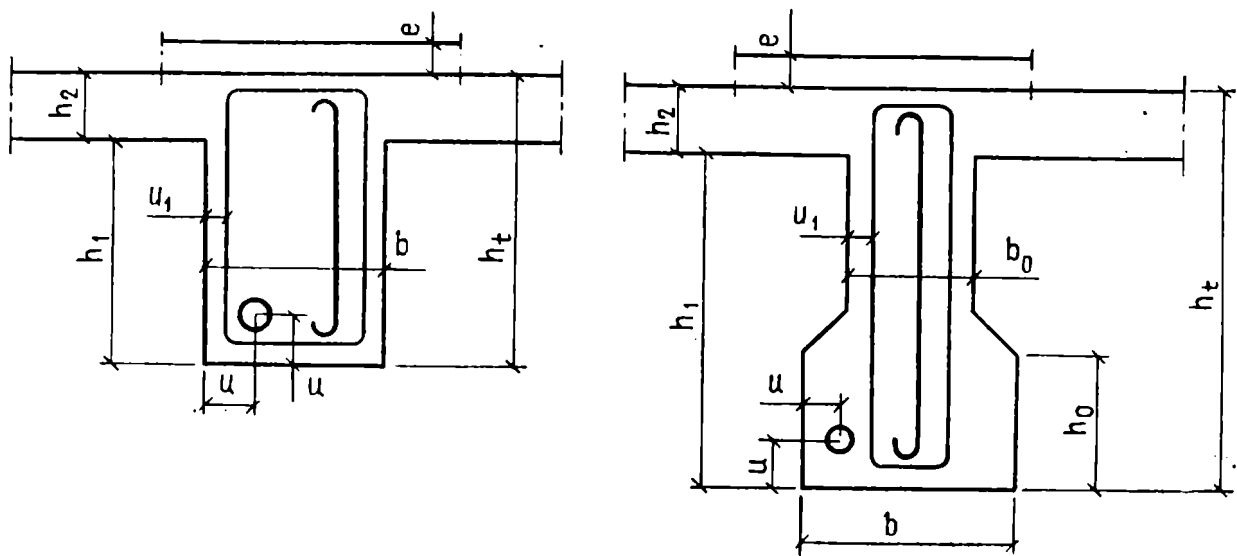


РИС. 3.43

**3.6.2. Расчетные нагрузки.** Согласно [3.8], полные учитываемые в расчетах нагрузки состоят

$$A = G + Q + W + S, \quad (3.36)$$

где  $G$  — постоянные нагрузки;  $Q$  — эксплуатационные нагрузки;  $W$  и  $S$  — ветровая и снеговая нагрузки.

С другой стороны, иногда следует учитывать напряжения, возникающие из-за ограничения перемещений от расширения рассматриваемого элемента, вызванного наличием примыкающих конструкций. Так как здания разделяются на отдельные помещения, пожар не воздействует одновременно на всю конструкцию, а лишь на одно или несколько помещений. Это справедливо для зданий с небольшим числом отдельных помещений, например складов, где, по крайней мере, в начальной стадии пожара огонь воздействует лишь на часть конструкции. Как в том, так и в другом случае напряжение, обусловленное ограничением расширения, зависит от жесткости конструкции. Оно вычисляется на основе коэффициента линейного или объемного температурных деформаций (см. разд. 3.3.2.3) из условий нагрева рассматриваемого элемента (см. разд. 3.5) и смежных конструкций с помощью метода, сходного с применяемым при расчете стальных конструкций (см. разд. 4.4.5).

Температурные деформации могут иметь разрушительные последствия, например, удлинение горизонтальных элементов вызывает обрушение вертикальных стоек по контуру здания.

**3.6.3. Упрощенные методы определения пределов огнестойкости.** Эти методы, разработанные на основе экспериментальных исследований, изложены в [3.8]. Они касаются лишь частных случаев, а их простота оплачивается недостаточно обеспеченной безопасностью. В частности, в них не учитывается напряженное состояние конструкций, поэтому мы предлагаем читателю использовать главным образом общий метод проверки, основанный на указаниях разд. 3.3—3.5.

**3.6.3.1. Колонны.** С помощью упрощенных методов можно рассчитать предел огнестойкости колонн, подверженных центральному сжа-

Таблица 3.11

|       | Требуемый предел огнестойкости класса SF—CFЧ            | 0,5                | 1  | 1,5 | 2  | 3  | 4  |
|-------|---------------------------------------------------------|--------------------|----|-----|----|----|----|
| a, см | Квадратное сечение                                      | 15                 | 20 | 24  | 30 | 36 | 45 |
|       | Квадратное сечение (огонь воздействует на одну сторону) | 10                 | 12 | 14  | 16 | 20 | 26 |
|       | Прямоугольное сечение ( $b=5a$ )                        | 10                 | 12 | 14  | 16 | 20 | 26 |
|       |                                                         |                    |    |     |    |    |    |
| u, см | Процент армирования Арматура, учитываемая в расчете     | Пренебрежимо малый |    |     |    |    | 7  |
|       |                                                         | 1                  | 2  | 3   | 4  | 6  |    |

тию, в которых продольное армирование не превышает 2%, а гибкость — 50%.

В табл. 3.11 для требований классов SF и CF по огнестойкости от 0,5 до 4 ч приведены минимальные размеры стороны  $a$  колонны квадратного или прямоугольного ( $b = 5a$ ) сечения, а также минимальная толщина  $u$  слоя бетона, защищающего арматуру.

Минимально допустимые сечения бетонных колонн при соотношении сторон от 1 до 5 можно определить путем линейной интерполяции в зависимости от требуемого предела огнестойкости.

**3.6.3.2. Затяжки.** Это понятие включает элементы, работающие на центральное растяжение или на растяжение с изгибом в случае, когда нейтральная ось находится вне пространства, ограниченного двумя плоскостями армирования.

В табл. 3.12 в зависимости от требований классов огнестойкости даны минимальные значения стороны  $a$  и минимальные значения толщины защитного слоя  $u$  этих затяжек.

Как указано выше, упрощенные методы можно заменить более точным расчетом, основанным на распределении температур в соответствии с указаниями разд.3.5. Однако в зонах опирания сохраняются значения  $u$  по табл. 3.12, так как отсутствует полная уверенность в надлежащем сцеплении арматуры с бетоном.

Таблица 3.12

| Характеристики сечения                                               | Требуемый предел огнестойкости класса SF, ч |      |     |     |      |      |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------|-----|-----|------|------|
|                                                                      | 0,5                                         | 1    | 1,5 | 2   | 2,5  | 3    |
| a, см                                                                | 8                                           | 12,5 | 15  | 20  | 24   | 28   |
| u, см                                                                | 2,5                                         | 4    | 5,5 | 6,5 | 8    | 9    |
| Сечение бетонного элемента $a \times b$ , см <sup>2</sup> , не менее | 128                                         | 312  | 450 | 800 | 1150 | 1570 |

Таблица 3.13

| Характеристики сечения |                                                        | Требуемый предел огнестойкости классов SF и CF, ч |    |     |    |    |    |
|------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----|-----|----|----|----|
|                        |                                                        | 0,5                                               | 1  | 1,5 | 2  | 3  | 4  |
| $a$ , см               |                                                        | 10                                                | 11 | 13  | 15 | 20 | 25 |
| $u$ , см               | Процент армирования<br>Арматура, учитываемая в расчете | Пренебрежимо малый                                |    |     |    |    |    |
|                        |                                                        | 1                                                 | 2  | 3   | 4  | 6  | 7  |

**3.6.3.3. Несущие стены.** Минимальные значения  $a$  и  $u$  приведены в табл. 3.13, ее данные распространяются на стены, гибкость которых не превышает 50.

**3.6.3.4. Опертые по контуру плиты перекрытий.** В табл. 3.14 приведены минимальные требования, которые следует учитывать в расчетах. Здесь  $h$  и  $e$  означают соответственно толщины плиты и лежащего на ней покрытия пола или слоя теплоизоляции,  $M_0$  — статически определяемый изгибающий момент, а  $M_1$  и  $M_2$  — изгибающие моменты, уравновешенные на опорах арматурными стержнями, свободная длина которых внутри рассматриваемого пролета  $l$  составляет соответственно  $l_1$  и  $l_2$ .

Для определения  $u$  и  $(l_1 + l_2)/l$  в зависимости от величины  $(M_1 + M_2)/2M_0$  используют линейную интерполяцию. Разумеется, эти указания относятся лишь к несущей арматуре.

Любой момент на опоре, превышающий по своей величине 15% статически определяемого момента в рассматриваемом пролете, можно учитывать в расчетах по указанным выше нормам лишь при условии, что соответствующее сечение удовлетворяет требованиям по хрупкости.

**3.6.3.5. Балки и прогоны.** В табл. 3.15 приведены данные минималь-

Таблица 3.14

| Огнестойкость, ч                                 |                                 | 0,5                 | 1    | 1,5 | 2   | 3   | 4    |     |
|--------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------|------|-----|-----|-----|------|-----|
| Минимальная толщина, см                          | $h+e$ , см                      | 6                   | 7    | 9   | 11  | 15  | 17,5 |     |
| При отсут-<br>ствии арма-<br>туры на опо-<br>рах | $\frac{M_1+M_2}{2M_0}=0$        | $u$ , см            | 1    | 2   | 3   | 4   | 6    | 8   |
|                                                  |                                 | $\frac{l_1+l_2}{l}$ | 0    | 0   | 0   | 0   | 0    | 0   |
| При наличии<br>арматуры на<br>опорах             | $\frac{M_1+M_2}{2M_0}\geq 0,50$ | $u$ , см            | 1    | 1,5 | 2   | 2,5 | 3,5  | 4,5 |
|                                                  |                                 | $\frac{l_1+l_2}{l}$ | 0,25 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,55 | 0,6 |

Таблица 3.15

| Требуемый предел<br>огнестойкости<br>класса SF, ч |                                                                                       | 0,5  | 1   | 1,5 | 2   | 3    | 4    |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------|-----|-----|-----|------|------|
| Минимальная толщина $h_2 + e$ , см                | Расстояние между осями прогонов не менее 2,5 м                                        | 5    | 6   | 8   | 10  | 14   | 16,5 |
|                                                   | Расстояние между осями прогонов менее 2,5 м                                           | 6    | 7   | 9   | 11  | 15   | 17,5 |
|                                                   | Перекрестные балки с шагом не более 2,5 м в обоих направлениях                        | 4    | 5   | 7   | 9   | 13   | 15,5 |
| $\frac{M_1 + M_2}{2M_0} = 0$                      | Балки прямоугольного сечения; минимальная ширина $b$ , см                             | 12   | 16  | 20  | 24  | 32   | 40   |
|                                                   | Балки с широкой опорной пяткой:                                                       |      |     |     |     |      |      |
|                                                   | минимальное $b$ , см                                                                  | 16   | 20  | 24  | 32  | 40   | 50   |
|                                                   | минимальное $b_0$ , см                                                                | 8    | 10  | 12  | 14  | 16   | 18   |
|                                                   | минимальное $h_0$ , см                                                                | 5    | 8   | 12  | 20  | 32   | 50   |
|                                                   | Минимальное число слоев нижней арматуры:                                              | 2    | 2   | 2   | 3   | 3    | 4    |
|                                                   | при минимальном значении $b$                                                          | 2,5  | 4   | 5,5 | 6,5 | 8    | 9    |
|                                                   | с минимальным числом стержней в слое                                                  | 2    | 2   | 2   | 3   | 4    | 5    |
|                                                   | при $b$ , превышающем большее из значений (1 м или $1,5 h_1$ ) при 10 стержнях в слое | 1    | 2   | 3   | 4   | 5    | 6    |
|                                                   | $(l_1 + l_2)/l$                                                                       | 0    | 0   | 0   | 0   | 0    | 0    |
| $\frac{M_1 + M_2}{2M_0} \geq 0,5$                 | Балки прямоугольного сечения; минимальное значение $b$ , см                           | 8    | 11  | 14  | 17  | 23   | 29   |
|                                                   | Балки с широкой опорной пяткой:                                                       |      |     |     |     |      |      |
|                                                   | минимальное $b$ , см                                                                  | 12   | 16  | 20  | 24  | 32   | 40   |
|                                                   | минимальное $b_0$ , см                                                                | 8    | 10  | 12  | 14  | 16   | 18   |
|                                                   | минимальное $h_0$ , см                                                                | 5    | 8   | 12  | 20  | 32   | 50   |
|                                                   | Минимальное число слоев нижней арматуры:                                              | 2    | 2   | 2   | 3   | 3    | 4    |
|                                                   | при минимальном значении $b$                                                          | 2,5  | 2,5 | 3,3 | 4   | 5,2  | 6    |
|                                                   | с минимальным числом стержней в слое                                                  | 2    | 2   | 2   | 3   | 3    | 4    |
|                                                   | при $b$ , превышающем большее из значений (1 м или $1,5 h_1$ ) при 10 стержнях в слое | 1    | 1,5 | 2   | 2   | 3    | 4,5  |
|                                                   | $(l_1 + l_2)/l$                                                                       | 0,25 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,55 | 0,6  |

|            | Требуемый предел<br>огнестойкости<br>класса SF, ч                                                                                                                                                                                                                            | 0,5                                                                   | 1 | 1,5 | 2 | 3 | 4   |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---|-----|---|---|-----|
| $u_1$ , см | $\tau \leq \bar{\sigma}_b$<br>при наличии обвязки<br>$\bar{\sigma}_b < \tau \leq \sigma_j$<br>если не менее 40%<br>воспринимается отгиба-<br>ми или хомутами<br>$\sigma_j < \tau \leq 5\bar{\sigma}_b$<br>Необходимо не менее<br>40% воспринимать отги-<br>бами или хомутами | Пренебрежимо мало<br>1,5   2   2,5   3   3   3,5<br>Пренебрежимо мало |   |     |   |   |     |
|            |                                                                                                                                                                                                                                                                              | 1,5                                                                   | 2 | 2,5 | 3 | 3 | 3,5 |

ных величин, которые следует учитывать в расчете. В таблице использованы те же обозначения, что в разд. 3.6.3.4 и на рис. 3.44. Кроме того,  $\tau$  означает касательное напряжение при действии перерезывающего усилия  $T$ , между которыми существует прямая зависимость

$$\tau = T / (0,875hb), \quad (3.37)$$

причем в этой формуле вместо  $b$  необходимо подставлять  $B_0$ , если балка имеет опорную пятю.

Наконец,  $\sigma_j$  и  $\bar{\sigma}_b$  означают соответственно предел прочности и допускаемое напряжение при растяжении.

*Примечание.* Для определения величин  $b$ ,  $u$  и  $(l_1 + l_2)/l$  в зависимости от промежуточных значений  $(M_1 + M_2)/2M_0$  используют линейную интерполяцию. Аналогичным образом определяют величину  $u$  в зависимости от ширины  $b$ , заключенной в пределах между минимальным и максимальным значениями (1 м или  $1,5 h_1$ ).

Любой момент на опоре, превышающий по своей величине 15% от момента  $M_0$ , можно учитывать в расчете лишь при условии, что в рассматриваемом сечении удовлетворяются требования по хрупкости.

Если ряд арматуры состоит из двух стержней, то они должны быть максимально приближены к центру. Промежуток между ними, необходимый для устройства защитного слоя бетона, должен быть приблизительно равным 3 см.

Прочность стали, используемой в качестве арматуры балок и плит перекрытий (разд. 3.6.3.4.), может воспрепятствовать правильному образованию пластических шарниров на промежуточных опорах статически неопределимых конструкций. Недавно проведенное экспериментальное исследование показало, что такая

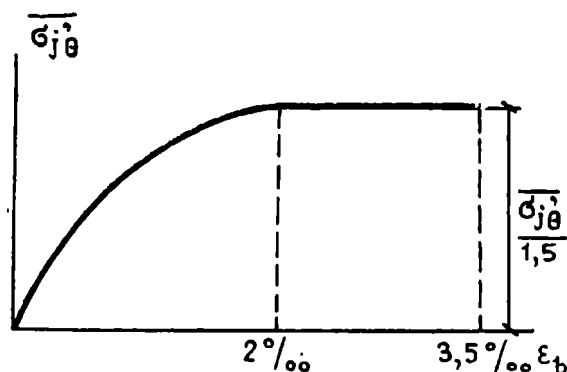


РИС. 3.44

арматура разрывается, сводя на нет весь эффект статической неопределимости. Поэтому данные таблиц 3.14 и 3.15 могут оказаться слишком оптимистичными в отношении толщины защитного слоя  $u$ , который оказывается значительно меньше при наличии арматуры на опорах. В связи с этим мы советуем читателю не пользоваться этими значениями, а всегда применять величины, указанные для варианта, при котором армирование на опорах отсутствует. Исключение составляют случаи, когда арматура выполнена из мягкой

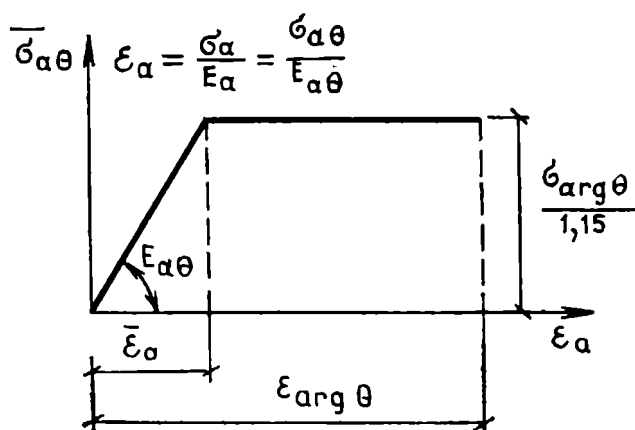


РИС. 3.45

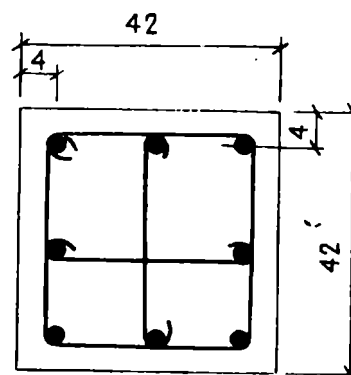


РИС. 3.46

стали и не может разорваться, обеспечивая тем самым правильное образование пластического шарнира. В приложении к главе приведен метод оценки поворота плит и неразрезных балок на опорах.

**3.6.3.6. Балки-стенки.** В табл. 3.16 приведены минимальные указания, которые следует учитывать в расчетах.

Таблица 3.16

| Требуемый предел огнестойкости классов CF и SF, ч           | 0,5 | 1   | 1,5 | 2  | 3   | 4  |
|-------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|----|-----|----|
| Минимальная толщина, см                                     | 10  | 11  | 13  | 15 | 20  | 25 |
| Значение $u$ для изгибаемой арматуры (только в пролете), см | 1   | 1,5 | 2   | 3  | 4,5 | 6  |

**3.6.4. Общий метод расчета пределов огнестойкости.** Представляется целесообразным изложить здесь общий метод при помощи нескольких простых примеров. Как и в [3.8], мы принимаем, что поведение бетона и арматуры описывается с помощью соответственно параболической с линейным участком (рис. 3.44) и обычной упругопластической (рис. 3.45) диаграмм.

На этих диаграммах использованы следующие обозначения:  $\sigma'_{j\theta}$  — предел прочности бетона при сжатии в  $j$ -й день ( $j \geq 90$ ) при пожаре и температуре  $\theta$  в центре тяжести сжатой зоны;  $\epsilon_b$  и  $\epsilon_a$  — предельные удлинения бетона и стали;  $\sigma_{arg \theta}$  — временное сопротивление стали на растяжение или сжатие при температуре  $\theta$ ;  $E_{a\theta}$  — модуль упругости стали при температуре  $\theta$ ;  $\epsilon_{arg \theta}$  — относительное удлинение стали при разрыве при температуре  $\theta$ .

Для деталей, имеющих площадку текучести, в [3.8] рекомендуется принимать меньшее из значений  $\sigma_{arg \theta} / 1,15$  или  $\sigma_{e\theta}$  (предел текучести при температуре  $\theta$ ) по диаграмме, приведенной на рис. 3.44. Там же указывается, что при применении действительной диаграммы работы стали  $\sigma_{a\theta} = f(\epsilon_a)$  величину  $\bar{\sigma}_{a\theta}$  можно определить условно с использованием понижающего коэффициента 1,15.

Следует отметить, что любой расчет на огнестойкость должен сопровождаться проверкой отсутствия сопутствующих вредных явлений,

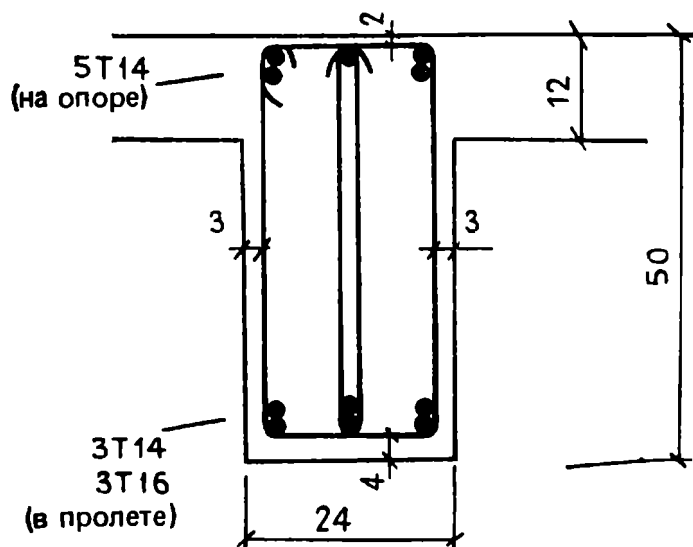


РИС. 3.47

в том числе: несоответствия деформаций бетона и стали; растрескивания бетона вследствие либо миграции воды, либо слишком резкого температурного градиента; потери устойчивости и пр.

В приводимых ниже примерах иллюстрируются некоторые из указанных проверок.

**3.6.4.1. Колонны.** Пусть имеется колонна квадратного сечения (рис. 3.46), воспринимающая суммарную нагрузку  $15 \cdot 10^4$  даН. Арматуру колонны

составляют 8 стержней T16. Требуемый предел огнестойкости — 2 ч.

**Расчет температуры бетона и арматуры.** Из табл. 3.6 можно найти, что через 120 мин средняя температура в колонне становится равной  $410^\circ\text{C}$ .

Температуру арматуры можно определить по данным табл. 3.4 путем двойной интерполяции по толщине защитного слоя  $u$  и ширине элемента:  $\theta = \theta_2 + [(50 - 42)/(50 - 18)](\theta_1 - \theta_2)$ , где  $\theta_1 = 580 + 1/3(690 - 580)$  и  $\theta_2 = 550 + 1/3(620 - 550)$ , откуда  $\theta = 584^\circ\text{C}$ .

Согласно рис. 3.34, температура арматуры в углах колонны составляет  $584 \cdot 1,2 = 700^\circ\text{C}$ , в то время как температура арматурных стержней в серединах сторон колонны равна  $584 \cdot 0,9 = 525^\circ\text{C}$ .

**Прочность бетона и стали.** Согласно рис. 3.14, мы принимаем, что прочность бетона на сжатие при температуре  $410^\circ\text{C}$  составляет лишь 70% его прочности в обычном состоянии. Предположим, что мы имеем дело с бетоном, прочность которого в возрасте 28 дней составляла 270 бар. Прочность при сжатии в  $j$ -й день ( $j \geq 90$ ) при пожаре составляет с учетом диаграммы работы бетона (рис. 3.45)  $\bar{\sigma}_j/\theta = 0,7 \cdot 1,2 \cdot 270/1,5 = 151$  бар.

Из рис. 3.32 можно установить, что временное сопротивление арматуры при 525 и  $700^\circ\text{C}$  составляет соответственно 55 и 18% ее прочности при нормальной температуре, которую мы принимаем равной 4700 бар. С учетом диаграммы работы стали (см. рис. 3.46) максимальное допускаемое напряжение равно  $0,55 \cdot 4700 : 1,15 = 2248$  бар для стержней в серединах сторон колонны и  $0,18 \cdot 4700/1,15 = 736$  бар для стержней в углах.

**Несущая способность колонны.** Бетон воспринимает нагрузку  $N_b = 42 \cdot 42 \cdot 151 = 267 \cdot 10^3$  даН, а арматура —  $N_a = 8,04 \cdot (2248 + 736) = 24 \cdot 10^3$  даН, откуда несущая способность колонны составляет  $N = N_a + N_b = 291 \cdot 10^3$  даН.

**Общая проверка.** Она осуществляется следующим образом:  $N > 150 \cdot 10^3$  даН, следовательно, предел огнестойкости колонны составляет не менее 2 ч.

**Дополнительные проверки.** 1. Относительная деформация бетона при центральном сжатии составляет  $\varepsilon_b = 2 \cdot 10^{-3}$ ,

а относительная деформация арматурных стержней в серединах сторон  $\varepsilon_a = \bar{\sigma}_{a\theta}/E_{a\theta}$ , где  $E_{a\theta} = E_a \sigma_{arg \theta} / \sigma_a$ ,  $E_{a\theta} = 2 \cdot 10^6 \cdot 0,55 \cdot 4700 / 4700 = 1,1 \cdot 10^6$ , т. е.  $\varepsilon_a = 2248 / 1,1 \cdot 10^6 = 2,04 \cdot 10^{-3}$ . Следовательно, значения  $\varepsilon_a$  и  $\varepsilon_b$  являются величинами одного порядка.

Аналогичным образом, относительная деформация арматурных стержней в углах колонны составляет

$$\varepsilon_a = \frac{736}{2 \cdot 10^6 \cdot 0,18 \cdot 4700 / 4700} = 2,04 \cdot 10^{-3}.$$

И в этом случае значения относительной деформации бетона и стали сравнимы между собой.

2. Температурные удлинения арматуры в углах колонны и окружающего бетона составляют примерно  $(\Delta l/l)_a = 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 700$ ;  $(\Delta l/l)_b = 10^{-5} \cdot 700$ , откуда при высоте колонны 3 м  $\Delta l_a = 29,4$  мм;  $\Delta l_b = 21$  мм.

Такая разница чревата образованием трещин в бетоне, что не может быть учтено расчетом и, следовательно, должно указывать на необходимость увеличения толщины защитного слоя арматуры.

3.6.4.2. *Балки.* Пусть балка пролетом 6 м (см. рис. 3.47) нагружена равномерно распределенной нагрузкой  $3,4 \cdot 10^3$  даН/м. Требуемый предел огнестойкости балки равен 2 ч.

Максимальный момент в середине пролета равен  $M_0 = 3,4 \cdot 10^3 \times \times 6^2/8 = 15,3 \cdot 10^3$  даН·м.

О п р е д е л е н и е т е м п е р а т у р ы б е т о н а и а р м а т у р ы. В табл. 3.7 указано, что температура арматуры, близкой к поверхности балки, по истечению 2 ч составляет  $770^\circ\text{C}$ , а температура внутренней арматуры —  $550^\circ\text{C}$ . Температура бетона в сжатой зоне балки не превышает  $250^\circ\text{C}$ .

М о м е н т в п р о л е т е. Он равен  $\sigma_{arg \theta} = 0,08 \cdot 4700 = 376$  бар, поскольку, согласно рис. 3.32, прочность арматурной стали при температуре  $770^\circ\text{C}$  не превышает 8% ее значения в холодном состоянии:  $\bar{\sigma}_{a\theta} = 376/1,15 = 327$  бар.

Аналогичным образом для внутренней арматуры имеем  $\sigma_{a\theta} = 0,55 \cdot 4700/1,15 = 2248$  бар. Следовательно, арматура воспринимает усилие  $F_a = \Sigma A \bar{\sigma}_{a\theta} = 7,10 \cdot 327 + 3,55 \cdot 2248 = 10\,302$  даН.

Прочность бетона на сжатие равна его прочности при нормальной температуре, откуда  $\bar{\sigma}'_{j\theta} = 1,2 \cdot 270/1,5 = 216$ . Бетон воспринимает усилие  $F_b = 24y \cdot 216$ .

Из равенства  $F_a = F_b$  можно найти высоту сжатой зоны  $y = 2$  см. Отсюда находим плечо  $z = 45,5$  см и далее момент в пролете  $M_{rl} = F_a z = 4790$  даН·м.

М о м е н т н а о п о р е. Поступая так же, как и при определении момента в пролете, получим: момент на опоре и момент в пролете равны моменту  $M_0$ , если балка несет нагрузку в течение требуемого времени  $M_{rt} + M_{ra} = M_0$ , откуда  $M_{ra} = 10\,510$  даН·м.

Очевидно, температура верхнего ряда арматуры не столь высока, чтобы оказать какое-либо негативное влияние на ее прочность:

$$\sigma_{\text{arg } \theta} = 4\,700 \text{ бар};$$

$$\bar{\sigma}_{\theta a} = 4700/1,15 = 4\,087 \text{ бар};$$

$$F_a = 7,7 \cdot 4087 = 31\,469,5 \text{ даН};$$

$$z = M_{ra} / F_a = 0,334 \text{ м};$$

$$y = 2(h - z) = 26,2 \text{ см}.$$

Поэтому сжимающее усилие в бетоне равно:  $F_b = F_a = by\bar{\sigma}'_{j\theta}$ ;  $\sigma'_{j\theta} = 50 \text{ бар}$ , откуда  $\sigma'_{j\theta} = 1,5\bar{\sigma}'_{j\theta} = 75 \text{ бар}$ ;  $\sigma'_{j\theta}/\sigma'_j = 0,23$ .

Такое уменьшение соответствует температуре около  $700^\circ\text{C}$ .

**Проверка.** Момент  $M_0$  может быть уравновешен, если температура бетона не превышает  $700^\circ\text{C}$ . Так (см. рис. 3.50), температура сжатой зоны находится в пределах от  $320$  до  $740^\circ\text{C}$ , и значит ее среднее значение явно составляет менее  $700^\circ\text{C}$ , т. е. требуемая стойкость к воздействию огня обеспечена.

**Дополнительная проверка.** Принимается, что диаграмма деформаций в сечении имеет вид двух треугольников с максимальным значением  $3,5 \cdot 10^{-3}$  при сжатии бетона. Кроме того, из сходства треугольной диаграммы и параболической диаграммы с линейным участком следует, что в пролете балки высота сжатой зоны составляет  $x = y/0,8 = 2,5 \text{ см}$ .

При этом наибольшая относительная деформация арматуры равна  $\epsilon_a = 3,5 \cdot 10^{-3} (h - x)/x \approx 0,058$ .

Если предположить, что относительное удлинение при разрыве в холодном состоянии, принимаемое также и для нагретого состояния, равно  $0,14$ , то приведенные выкладки означают, что арматура не разорвется.

**3.6.4.3. Плиты.** Пусть имеется плита толщиной  $17 \text{ см}$ , в которой верхний слой арматуры, расположенный на расстоянии  $1,5 \text{ см}$  от поверхности, состоит из пяти стержней Т 10 (на метр длины), а нижний слой арматуры, уложенный на расстоянии  $2,5 \text{ см}$  от поверхности, состоит из шести стержней Т 12 на метр длины. Нагрузка на плиту составляет  $725 \text{ даН/м}^2$ . Требуется проверить, сохранит ли плита огнестойкость в течение  $2 \text{ ч}$  при стандартном пожаре при условии, что ее пролет равен  $5,5 \text{ м}$ .

Изгибающий момент в плите составляет  $M_0 = 725 \cdot 5,5^2/8 = 2740 \text{ даН}\cdot\text{м/м}$ .

**Определение температуры бетона и арматуры.** Согласно табл. 3.10, температура нижнего слоя арматуры по истечении  $2 \text{ ч}$  равна  $625^\circ\text{C}$ , а температура верхнего слоя арматуры заведомо ниже ( $100^\circ\text{C}$ ).

Путем экстраполяции данных табл. 3.10 можно определить, что температура обращенной к огню поверхности составляет  $810^\circ\text{C}$ , в то время как температура пожара достигает  $1029^\circ\text{C}$ . Принимаем, что температура нижних волокон равна  $900^\circ\text{C}$ .

В то же время температура сжатой зоны явно меньше ( $250^\circ\text{C}$ ).

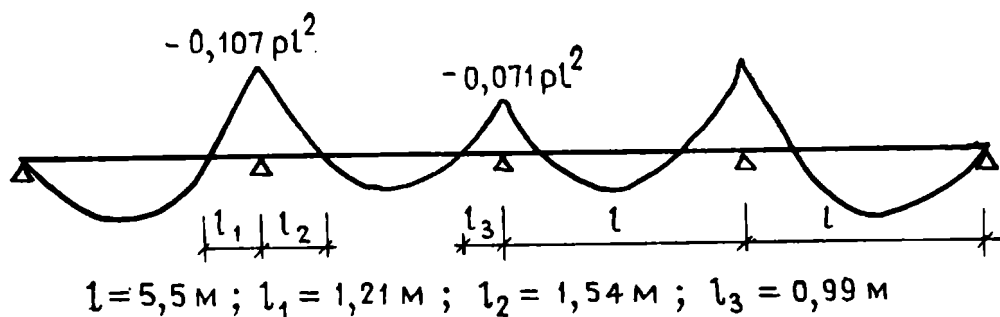


РИС. 3.48

Момент в пролете. Его определяют следующим образом:  $\theta_a = 625^\circ \text{C} \Rightarrow \sigma_{\text{arg } \theta} / \sigma_a = 0,375$ ;  $\bar{\sigma}_{a\theta} = 0,375 \cdot 4700 / 1,15 = 1532 \text{ бар}$ , откуда величина растягивающего усилия, воспринимаемого арматурой, составляет  $F_a = A \bar{\sigma}_{a\theta} = 6,78 \cdot 1532 = 10\,391 \text{ даН/м}$ ,  $\theta_b < 250^\circ \text{C} \Rightarrow \sigma'_{j\theta} / \sigma'_j = 1$ ;  $\bar{\sigma}'_{j\theta} = 324 / 1,5 = 216 \text{ бар}$ . Отсюда следует, что воспринимаемое бетоном сжимающее усилие равно  $F_b = 216 \cdot 100y$ ;  $F_a = F_b \Rightarrow y = 0,48 \text{ см}$ .

Далее получаем плечо  $z = h - y/2 = 14,26 \text{ см}$ . Тогда момент в пролете составляет  $M_{rt} = 1481 \text{ даН}\cdot\text{м/м}$ .

Момент на опоре. Определим его из формулы  $\bar{\theta}_b = 900^\circ \text{C} \Rightarrow \sigma'_{j\theta} / \sigma'_j \approx 0,15$ , откуда  $\bar{\sigma}'_{j\theta} = 0,15 \cdot 324 / 1,5 = 32,4 \text{ бар}$ ;  $\theta_a < 100^\circ \text{C} \Rightarrow \sigma_{\text{arg } \theta} / \sigma_a = 1$  и, значит,  $\bar{\sigma}_{a\theta} = 4700 / 1,15 = 4087 \text{ бар}$ .

Следовательно, пять стержней Т 10 воспринимают растягивающее усилие  $F_a = 3,93 \cdot 4087 = 16\,061 \text{ даН/м}$ .

На бетон передается сжимающее усилие  $F_b = 32,4 \cdot 100 \cdot y$ ;  $F_a = F_b \Rightarrow y = 4,96 \text{ см}$ , откуда находим плечо и момент на опоре:  $z = 13,02 \text{ см}$ ,  $M_{ra} = 16\,061 \cdot 13,02 \cdot 10^{-2} = 2091 \text{ даН}\cdot\text{м/м}$ .

Проверка. Полный изгибающий момент, воспринимаемый плитой, составляет  $3572 \text{ даН}\cdot\text{м/м}$ . Он значительно превышает максимальный момент  $M_0$  от нагрузки на плиту, что обеспечивает требуемую огнестойкость. В противном случае следовало бы произвести повторный расчет в предположении более высокой (но в обоснованных пределах) температуры бетона на обращенный к огню поверхности.

Дополнительные проверки. 1. Длина арматуры в верхнем слое плиты не должна быть меньше длины участка, на котором изгибающий момент имеет отрицательный знак. В качестве примера на рис. 3.48 приведена эпюра моментов для четырехпролетной неразрезной балки.

Кроме того, за счет образования пластических шарниров в ходе пожара происходит изменение эпюры изгибающих моментов. В связи с этим необходимо учитывать в расчете длину арматуры. Это условие указано в табл. 3.14, где рекомендуется принимать  $l_1 + l_2 = 0,5l = 2,75 \text{ м}$ . Однако в этой таблице нет указаний относительно распределения указанной длины между величинами  $l_1$  и  $l_2$ ; в связи с этим представляется логичным распределять ее пропорционально моментам на опорах. Таким образом, будем иметь  $l_2 = 2,75 \cdot 0,107 / 0,178 = 1,65 \text{ м}$  и  $l_3 = 2,75 \cdot 0,071 / 0,178 = 1,1 \text{ м}$ , что представляется вполне приемлемым.

2. Высота сжатой зоны бетона составляет:  $x = y/0,8 = 0,48/0,8 = 0,6$  см, а относительное удлинение арматуры  $\epsilon_x = 3,5 \cdot 10^{-3} (h - x)/x = 0,08$  при  $\epsilon_a < \epsilon_{arg} = 0,14$ , т. е. деформации находятся в допустимых пределах.

### 3.7. ОГНЕСТОЙКОСТЬ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Изложенные выше методы расчета применимы как для обычного так и для преднапряженного железобетона. Однако конструкции из преднапряженного железобетона имеют ряд присущих только им свойств, некоторые из которых с точки зрения огнестойкости являются неблагоприятными. Например:

преднапряженные элементы имеют меньшие поперечные сечения и, следовательно, обладают меньшей тепловой инерцией, чем элементы из обычного бетона, вследствие чего они нагреваются быстрее;

напрягаемая арматура работает при значительно бóльших усилиях, чем арматура обычного железобетона, поэтому она имеет меньшую температуру разрушения (см. гл. 4);

преднапряженные конструкции обычно являются статически определенными и, следовательно, не обладают такими важными достоинствами, как непрерывность и монолитность [3.23].

С другой стороны, напрягаемая арматура обычно защищается более толстыми слоями бетона, чем обычные арматурные стержни, которые должны располагаться как можно ближе к растянутой поверхности элемента. Однако это достоинство не может компенсировать указанных выше недостатков и, в частности, опасности внезапного обрушения в случае местного оголения напрягающего троса вследствие растрескивания бетона (см. рис. 3.2). К сожалению, аварии такого рода происходят достаточно часто, вынуждая проектировщиков относиться к преднапряженному железобетону с особой осторожностью. Помимо упомянутых выше проблем необходимо тщательно изучить опасность обрушения балок двутаврового сечения при действии перерезывающего усилия вследствие образования горизонтальных трещин в стенке [3.24].

### 3.8. ЧАСТНЫЕ ЗАДАЧИ

**3.8.1. Огнестойкость клеевых соединений в бетоне.** В последнее время после проведения экспериментальных исследований клеевые соединения начинают находить применение и в строительстве. В связи с этим дополнительно встает вопрос об огнестойкости таких соединений. Обычно применяют клеи на основе эпоксидных смол горячего (при заводском изготовлении конструкций) и холодного (при выполнении работ на строительной площадке) твердения. В общем случае такие клеи быстро теряют свои механические свойства при нагреве — модуль упругости при сжатии уменьшается в десять раз при нагреве от 20 до 80 °С.

В ожидании более детальных экспериментальных исследований и разработки клеев, обладающих более высокими характеристиками, следует стремиться к применению соединений (стыков), менее чувствительных к воздействию тепла, т. е. имеющих меньшую толщину, а также форму (V-образную, С-образную, S-образную или ступенчатую), ограничивающую нагрев клея [3.25].

**3.8.2. Коррозия арматуры.** Различные синтетические материалы, в частности поливинилхлорид, выделяют при горении значительное количество хлористо-водородной (соляной) кислоты, которая проникает в бетон и вызывает коррозию арматуры. Недавнее экспериментальное исследование [3.26], проведенное в здании, где был создан пожар с целью изучения особенностей горения поливинилхлорида, показало, что:

в бетоне мигрируют ионы хлорида со скоростью, в первом приближении пропорциональной корню квадратному из времени, причем глубина их проникновения в бетон примерно утраивается в течение шести лет (65 мм);

на поверхности бетона хлориды постепенно вымываются, вследствие этого их концентрация уменьшается;

новый бетон, используемый для заделки проломов, ниш и пр., а также в качестве поверхностного слоя элемента, постепенно охватывается миграцией ионов хлорида, глубина которой в течение шести лет достигает 20—35 мм в зависимости от того, находится рассматриваемый элемент в помещении или на открытом воздухе. Такого «заражения» не происходит, если в качестве нового бетона применяют сборные железобетонные элементы, приклеиваемые эпоксидными клеями.

В заключение отметим, что дальнейшее использование бетонных конструкций, подвергнутых воздействию пожара, можно допустить лишь после измерения скорости миграции ионов хлорида и проверки постоянства этой скорости. Чаще всего поверхностный слой бетона следует удалять и заменять новым.

#### *Приложение. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОВОРОТА НА ОПОРАХ НЕРАЗРЕЗНЫХ БАЛОК И ПЛИТ*

Испытания показали, что во многих случаях арматура на опорах препятствует повороту конструкции на опорах, достаточному для правильного образования пластического шарнира. Это вызывает ее быстрый разрыв, превращающий неразрезную балку или плиту в отдельные статически определимые элементы, обладающие значительно меньшей несущей способностью. Во избежание такого катастрофического явления следует использовать достаточно мягкую арматурную сталь, способную деформироваться вместе с балкой или имеющую возможность достаточного сдвига в своей бетонной оболочке. Настоящее приложение содержит некоторые аспекты теоретического решения этой проблемы.

Пусть имеется элемент произвольного поперечного сечения, распределение температуры в котором является известным (рис. 3.49). Предположив, что при совместном действии нагрузок и температуры его поперечные сечения остаются плоскими, относительную деформацию двух соседних волокон можно определить из выражения

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \omega_0 y.$$

$$(3.38)$$

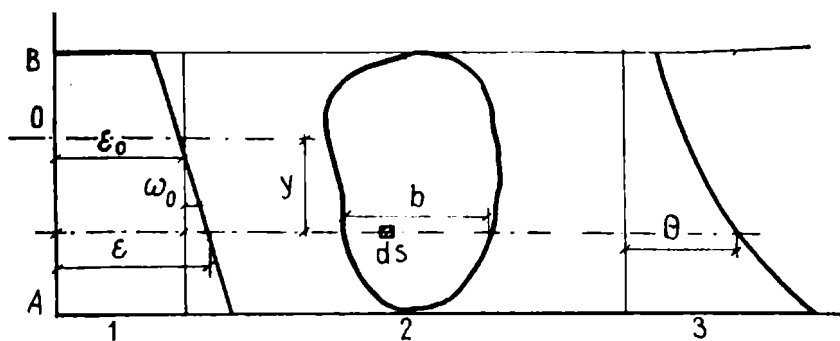


РИС. 3.49

1 — эпюра деформаций; 2 — поперечное сечение; 3 — эпюра распределения температур

Напряжение, возникающее при совместном действии деформации  $\varepsilon$  и температурного расширения  $\alpha\theta$ , составляет

$$\sigma = E(\alpha\theta - \varepsilon). \quad (3.39)$$

Для удобства расчета определим так называемое исходное напряжение

$$\sigma_0 = E_0 \alpha \theta_0. \quad (3.40)$$

Тогда действительное напряжение в сечении можно представить в виде суммы

$$\sigma = \underbrace{\sigma_0 (E/E_0) (\theta/\theta_0)}_{\text{напряжение от сжатия перемещений волокон сечения}} - \underbrace{(E/E_0) (E_0 \varepsilon_0 - E_0 \omega_0 y)}_{\text{напряжение от линейного перемещения сечения}}$$

Теперь нормальное усилие  $N$  и изгибающий момент  $M$ , определяемые из уравнений (3.42) и (3.43), можно ввести в уравнения равновесия (3.44) и (3.45), которые содержат три термомеханические характеристики сечения  $A$ ,  $B$  и  $C$ , а также две функции температуры  $U$  и  $V$ , описываемые уравнениями (3.46) — (3.50):

$$N = \int \int (S) \sigma dS; \quad (3.42)$$

$$M = \int \int (S) \sigma y dS; \quad (3.43)$$

$$N = E_0 (U - A\varepsilon_0 + B\omega_0); \quad (3.44)$$

$$M = E_0 (V - B\varepsilon_0 + C\omega_0). \quad (3.45)$$

Термомеханические характеристики сечения

$$A = \int \int (S) \frac{E}{E_0} dS; \quad (3.46)$$

$$B = \int \int (S) \frac{E}{E_0} y dS; \quad (3.47)$$

$$C = \int \int (S) \frac{E}{E_0} y^2 dS. \quad (3.48)$$

Функции температуры в сечении

$$U = \alpha \int \int (S) \frac{E}{E_0} \theta dS; \quad (3.49)$$

$$V = \alpha \int \int (S) \frac{E}{E_0} \theta y dS. \quad (3.50)$$

Если выбрать начало координат таким образом, чтобы характеристика  $B$  была равна нулю, и уравновесить каждое волокно отношением  $E/E_0$ , получим

$$A = S; \quad B = 0; \quad C = I. \quad (3.51)$$

По существу, величины  $A$  и  $C$  играют роль площади и момента инерции уравновешенного таким образом сечения. Теперь уравнения (3.44) и (3.45) принимают вид

$$N = E_0 (U - S\varepsilon_0); \quad (3.52)$$

$$M = E_0 (V + I\omega_0). \quad (3.53)$$

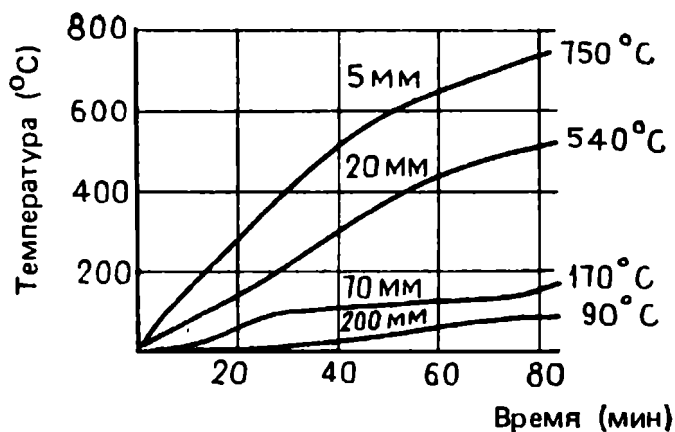


РИС. 3.50. ИЗМЕНЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ БЕТОНА В РАЗЛИЧНЫХ ТОЧКАХ ПЛИТЫ (НА РАССТОЯНИИ 5, 20, 70 И 200 ММ ОТ ОБРАЩЕННОЙ К ОГНЮ ПОВЕРХНОСТИ)

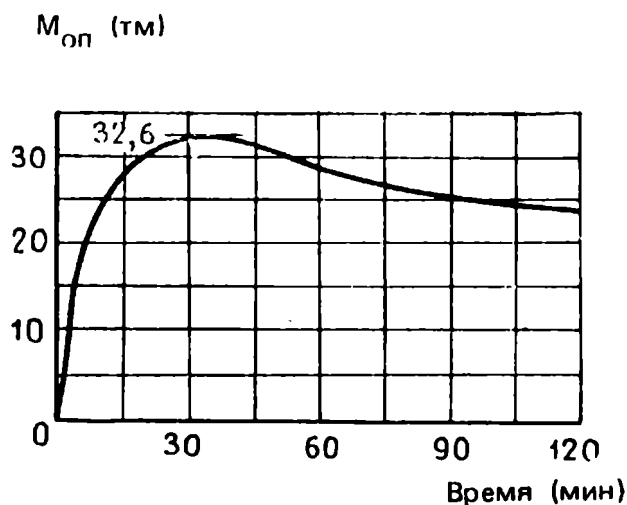


РИС. 3.51

Отсюда можно получить выражения перемещения  $\varepsilon_0$  и угла поворота  $\omega_0$  сечения при действии только термических напряжений ( $M = N = 0$ ):

$$\varepsilon_0 = U/S \quad (3.54)$$

$$\omega_0 = -V/I \quad (3.55)$$

и при действии только внешних усилий:

$$\varepsilon_0 = N/E_0 S; \quad (3.56)$$

$$\omega_0 = M/E_0 I. \quad (3.57)$$

Далее расчет сводится к следующим процедурам:

1) определение эпюры распределения температур в сечении (см. разд. 3.5);  
2) вычисление термомеханических характеристик  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и функций температуры  $U$  и  $V$ . Для этого следует воспользоваться указаниями разд. 3.3.1.3, где рассмотрено применение модуля упругости бетона в зависимости от температуры. Можно также, следуя [3.27], принять кривую, выражающую решение уравнения (3.58) и проходящую через точки, рекомендуемые в [3.8]:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{115,2}{(\theta/100)^4 + 24,8 (\theta/100)^2 + 115,2}; \quad (3.58)$$

3) определение перемещений и поворотов по формулам (3.52)—(3.57);

4) определение статически неопределимого момента от действия температуры, возникающего на опоре при повороте  $\omega_0$ ;

5) сравнение указанного момента с несущей способностью сечения конструкции на опоре.

Проиллюстрируем приведенный метод простым примером [3.27].

Пусть имеется плита толщиной 23 см, лежащая на трех опорах, на которую в пролете длиной 2,55 м действует равномерно распределенная нагрузка 480 кгс/м<sup>2</sup>, а в пролете длиной 6,25 м — нагрузка 210 кгс/м<sup>2</sup>. Общая площадь сечения арматуры на опоре составляет 5,86 см<sup>2</sup> при полезной высоте до арматуры 16,7 см. В пролете площадь сечения арматуры составляет 4,8 см<sup>2</sup> при полезной высоте 17,5 см. Предел текучести и временное сопротивление арматурной стали равны соответственно 53 и 61 кгс/мм<sup>2</sup>. Модуль упругости бетона равен 340 000 кгс/см<sup>2</sup>, а его прочность на растяжение и сжатие составляет соответственно 23,2 и 270 кгс/см<sup>2</sup>.

Из обычного расчета для ненагретого состояния плиты следует, что момент на средней опоре равен 2,8 тм/м, а предполагаемый разрушающий момент — 5,7 тм/м.

На основании испытаний, дающих распределение температур в плите (рис. 3.50), можно вычислить угол поворота  $\omega_0$  и статически неопределимый момент, который возникает от него на средней опоре. На рис. 3.51 представлено изменение

этого момента во времени. Можно отметить, что момент весьма быстро достигает несущей способности сечения, составляющей  $5,7 - 2,8 = 2,9$  тм/м, в связи с чем быстрое разрушение становится весьма вероятным. Это показывает нам, что запас деформации в шарнире возможен лишь на 1,5%, в то время как они должны быть не менее 6,5% с тем, чтобы плита выдержала воздействие огня в течение 2 ч. При применении гладкой арматурной стали деформационная способность составила бы 14—20%, что было бы вполне достаточно для обеспечения требуемой огнестойкости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [3.1] T. Z. Harmathy—*Thermal properties of concrete at elevated temperature*. National Research Council, Research paper n° 426, Ottawa, Canada.
- [3.2] D. L. Kantro, L. E. Copeland. — *The stoichiometry of the hydration of Portland cement*. Chemistry of the cement, proceeding, 4th international symposium, National Bureau of Standards, Monograph 43, vol. 1, Washington D. C., U. S. A., 1960.
- [3.3] S. Brunauer, S. A. Greenberg. — *The hydration of tricalcium silicate and  $\beta$ -dicalcium silicate at room temperature*. Chemistry of the cement.... cf. [4—2].
- [3.4] S. Thelandersson. — *Effect of high temperatures on tensile strength of concrete*. Lund Institute of Tehnology, division of structural mechanics and concrete construction, Lund, Sweden.
- [3.5]. T. Z. Harmathy. — *Effect of moisture on the fire endurance of building elements*. National Research Council, Research paper n° 270 of the division of building research, 1965, Ottawa, Canada.
- [3.6.] T. Z. Harmathy, T. T. Lie. — *Experimental verification of the rule of moisture moment*. National Research Council, Research paper n° 484 of the division of building research, 1971, Ottawa, Canada.
- [3.7] S. Thelandersson. — *Mechanical behavior of concrete under torsional loading at transient, high-temperature conditions*. Lund Institute of Technology, division of structural mechanics and concrete construction, bulletin 46, 1974, Lund, Sweden.
- [3.8.] *Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton*. — Cahier du CSTB n° 1270, Paris.
- [3.9] J. Kruppa. — *Comportement au feu des bétons légers et des bétons normaux*. Colloque sur les bétons légers, INSA de Rennes, sept, 1976.
- [3.10] J. C. Dotreppe. — *Prévision par le calcul du comportement à l'incendie des structures simples*. Université de Liqdge, Service Ponts et Charpentes, Belgique.
- [3.11] T. T. Lie, D. E. Allen. — *Calculation of the fire resistance of reinforced concrete columns*. National research council, Technical paper n° 378 of the division of building research, 1972, Ottawa, Canada.
- [3.12] T. T. Lie. — *Fire and buildings*. National research council, Ottawa, Canada.
- [3.13] T. Harada. — *Research on fire proof of concrete and reinforced concrete construction*. Tokyo, Institute of Technology, 1961.
- [3.14] М. Я. Ройтман. Основы противопожарного нормирования в строительстве. М., Изд-во литературы по строительству, 1969.
- [3.15] Y. Andeberg, S. Thelandersson. — *Stress and deformation characteristics of concrete at high temperature*. 1-General discussion and critical review of literature. Lund Institute of Technology, bulletin 34 of division of structural mechanics and concrete construction, 1973, Lund, Sweden.
- [3.16] R. Iding, J. Lee, B. Bresler. — *Behavior of reinnnforced concrete under variable elevated temperature*. University of California, Fire research group, report UCB FRG 75-8, 1975, Berkeley, U. S. A.
- [3.17] C. R. Cruz. — *Elastic properties of concrete at high temperatures*. Journal of the PCA Res. and Dev. Lab., jan. 1966.
- [3.18] Y. Collet. — *Conductivité thermique du matériau béton*. Centre de recherches de l'industrie cimentière, Bruxelles, Belgique.

[3.19] A. Coin. — *Températures dans un solide hétérogène au cours d'un incendie*. Annales de l'Institut Technique du Bât. et des T. P., n° 339, mai 1976.

[3.20] J. Becker, H. Bizri, B. Bresler. — *FIRES-T. A computer program for the fire response of structures-thermal*. University of California, Fire Research Group, Report UCB-FRG 74-1, jan. 74.

[3.21] *Prévision par le calcul du comportement au feu des structures et techniques actuelles de protection*. — Troisième partie: structures en béton armé. Annales de l'ITBTP, n° 343, octobre 1975.

[3.22] *Sécurité et résistance au feu des structures en béton*. — Annales de l'ITBTP n° 294, juin 1972.

[3.23] A. W. Hill, L. A. Ashton. — *The fire resistance of prestressed concrete*. Civil Eng. and Pub. Works Review, nov. 57.

[3.24] J. Boon, T. H. Monnier. — *Fire resistance of prestressed concrete beams*. Heron, Stelvin Laboratory of Delft Univ. of Techn. and I. B. B. C. Institute TNO, The Netherlands.

[3.25] R. Forge. — *Contribution à l'étude du comportement au feu des colles époxydes*. Journées d'études: le collage structural et le renforcement par résines des structures de la construction. Annales de l'I. T. B. T. P., n° 349, avril 77.

[3.26] H. Martin. — *The migration of chloride ions with time in concrete exposed to a PVC-fire*. Institut für Massivbau, Technische Universität, München, R.F.A.

[3.22] J. Muller. — *Comportement au feu des dalles continues en béton armé*. Journées d'étude de l'I.T.B.T.P., 28 et 29 octobre 1975, Paris.

## Глава 4. ОГНЕСТОЙКОСТЬ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### 4.1. ВВЕДЕНИЕ

Стальные конструкции обладают невысокой огнестойкостью, поэтому быстро обрушиваются в горящем здании, вызывая жертвы как среди его обитателей, так и среди спасателей-пожарных. В результате пожара металлические конструкции подвергаются значительным деформациям, а груды искореженного металла всегда производят неблагоприятное впечатление на людей независимо от того, насколько они посвящены в вопросы пожарной безопасности.

Однако приведенное выше мнение оказывается спорным, особенно в части вытекающих из него последствий. Это объясняется тем, что об огнестойкости какой-либо конструкции нельзя судить по ее остаткам, поскольку они никоим образом не отражают хода пожара и, в частности, его промежуточной стадии, когда находившиеся в здании люди смогли эвакуироваться из него; промежуточную стадию весьма трудно уловить, а к ошибочному суждению приводит вид остатков конструкции, т. е. конечная стадия пожара. Кроме того, стойкость конструкций против воздействия огня не является панацеей от всех бед.

Тем не менее неоспоримо, что сталь, будучи специально не защищенной, очень плохо сопротивляется действию огня, например статически определяемая прокатная балка IPE 200 при нагрузке, вызывающей напряжение не более  $2/3$  предела текучести стали, при пожаре обрушивается самое большее через 10 мин.

Поэтому металлические конструкции необходимо правильно за-проектировать, чтобы они обладали огнестойкостью того же порядка, что и конструкции из других материалов.

## 4.2. МАТЕРИАЛЫ И СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ

**4.2.1. Материалы.** Защита металлических конструкций обычно заключается в постановке между источником огня и металлом слоя материала с малой температуропроводимостью:

$$\alpha = \lambda / C_p \rho,$$

где  $\lambda$  — теплопроводность;  $C_p$  — массовая удельная теплоемкость;  $\rho$  — плотность.

Между тяжелыми (например, бетон) и легкими (гипс, асбест, вермикулит) защитными материалами имеется возможность выбора. Действие тяжелых материалов основано на их значительной объемной удельной теплоемкости  $C_p \rho$ , а эффективность легких материалов объясняется их малой теплопроводностью  $\lambda$ .

Защитить металл от огня можно путем непосредственного нанесения на его поверхность защитного материала, наклеивания защитных плиток и устройства сборных элементов.

Рассмотрим материалы, наиболее часто применяемые в настоящее время в качестве защиты стальных конструкций от огня.

**4.2.1.1. Бетон.** Устройство массивного защитного слоя бетона (рис. 4.1, в) предусматривается, как правило, лишь в тех случаях, когда бетон выполняет помимо огнезащитных и другие функции, например воспринимает часть действующей на элемент нагрузки. Таким образом, защищаются обычно лишь колонны и стойки. В этом случае можно применять различные виды бетонов и, в частности, автоклавные ячеистые бетоны, обладающие меньшим весом и повышенными теплоизоляционными свойствами. Защищают металлический элемент путем устройства достаточно толстого бетонного массива защитного слоя либо по периметру элемента, либо между его полками (при двутавровом сечении).

Можно применять также сборные железобетонные защитные плиты, изготавливаемые непосредственно на площадке или в заводских условиях и соединяемые на клею, на скобах и т. п. (рис. 4.2). Поскольку такие бетонные плиты являются довольно тяжелыми, для снижения их веса обычно используют ячеистые бетоны. Такие бетоны обычно изготавливают в автоклавах, где между компонентами, к которым добавлено вещество, способствующее образованию пористой структуры, происходит реакция, аналогичная той, какая имеет место при получении силикатного кирпича. Теплопроводность ячеистых бетонов составляет 0,2—0,3 Вт/(м·°С).

Балки и другие изгибаемые элементы можно защитить с помощью опалубки, опирающейся на внутреннюю поверхность нижней полки балки и позволяющей получить защитный слой из бетона при заливке плиты (рис. 4.3). При этом особенно важно достичь совместной работы стали и бетона (см. гл. 5).

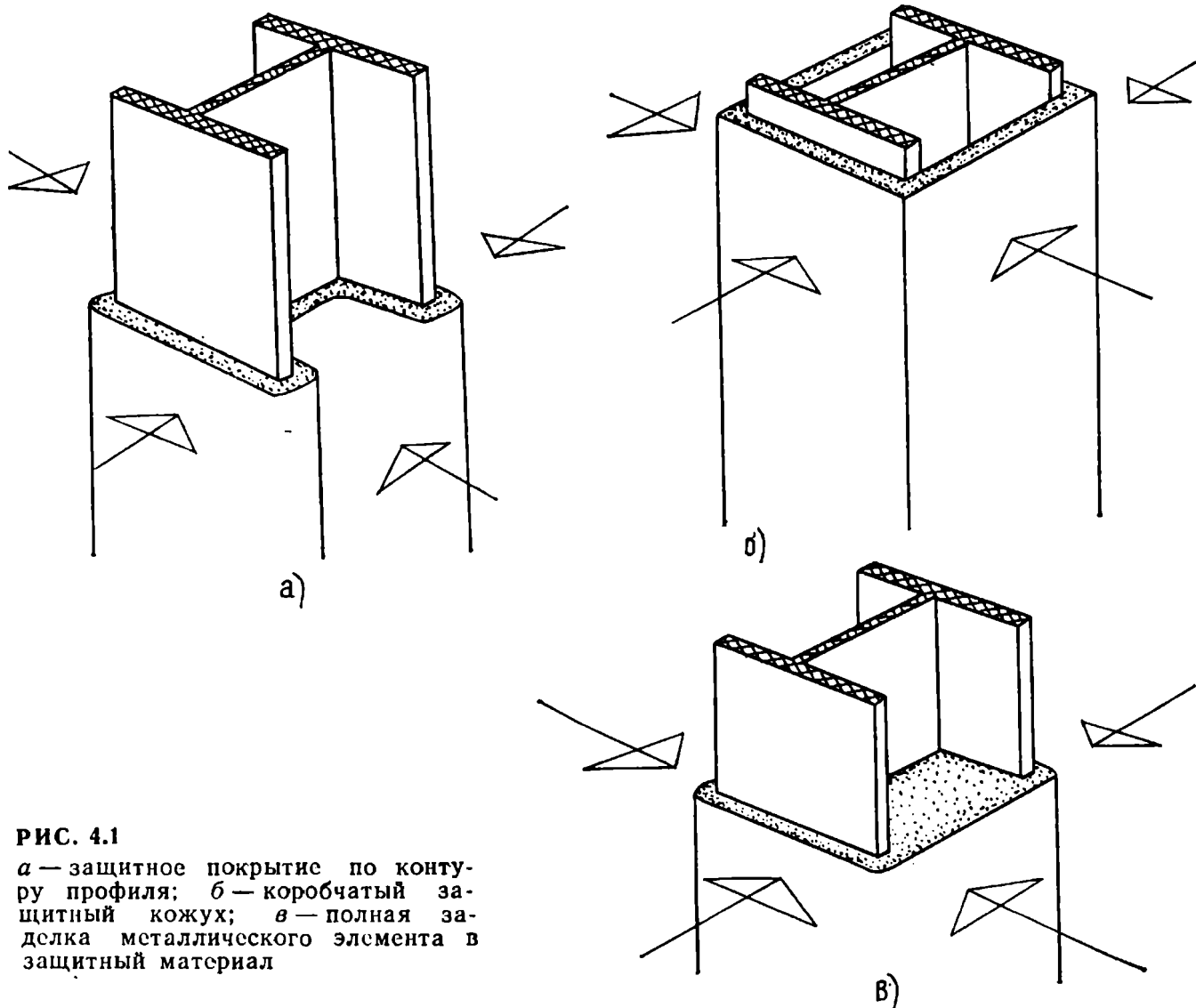


РИС. 4.1

а — защитное покрытие по контуру профиля; б — коробчатый защитный кожух; в — полная заделка металлического элемента в защитный материал

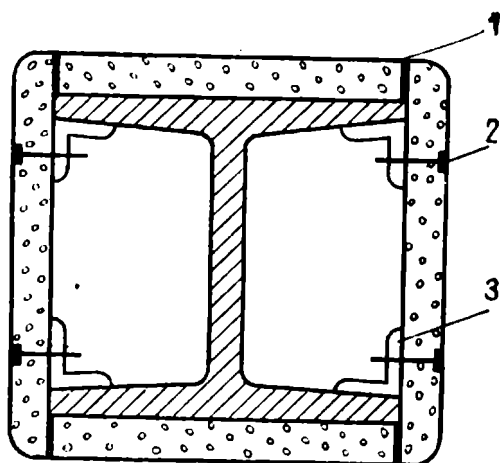


РИС. 4.2. ЗАЩИТА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ КОЛОННЫ СБОРНЫМИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫМИ ПЛИТАМИ

1 — клеевой слой; 2 — нержавеющий болт; 3 — приваренный угол

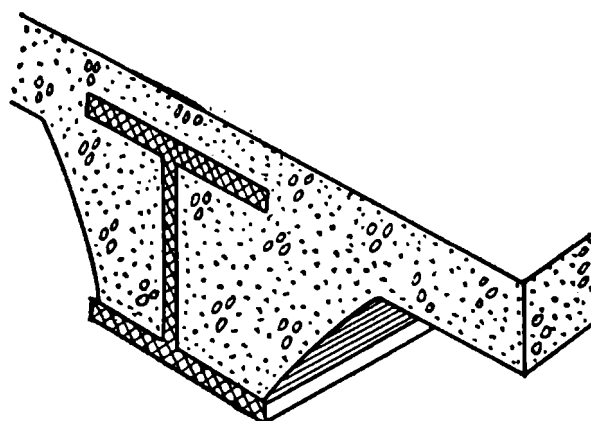


РИС. 4.3

4.2.1.2. Гипс [4.1]. Обычно строительный гипс имеет состав —  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , поэтому в сухом состоянии он содержит 20% конституционной воды.

В случае пожара такой запас воды в гипсе играет весьма важную роль, поскольку требуется значительное количество тепловой энергии для превращения молекул гипса в безводный сульфат кальция и выпа-

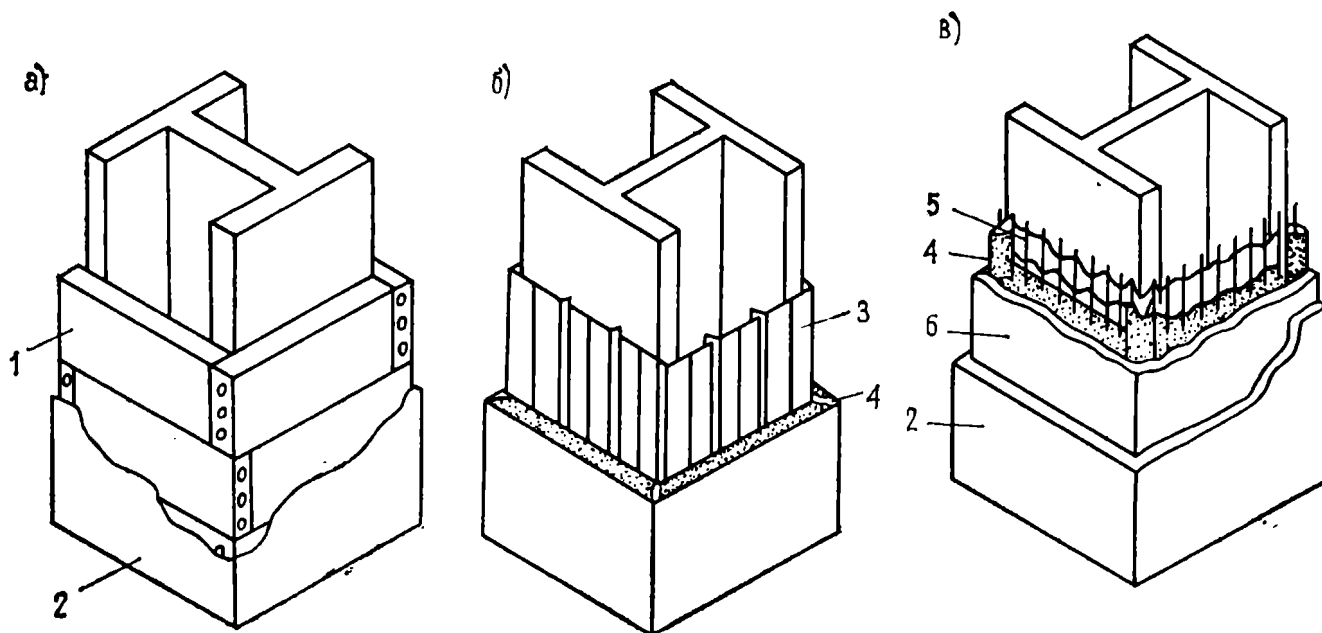


РИС. 4.4

1 — многпустотные гипсовые плитки; 2 — отделочный слой; 3 — сетка или иная основа для защитного слоя; 4 — уголок; 5 — арматурная сетка; 6 — гипсовая штукатурка

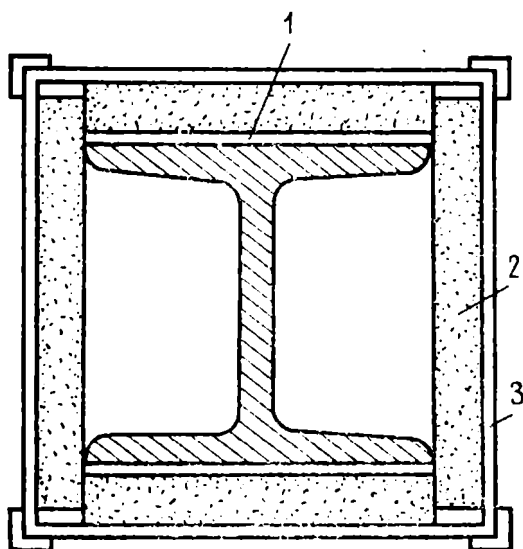


РИС. 4.5

1 — клеевой слой; 2 — плита из вермикулита; 3 — стальной лист

ривания высвобождающейся воды. Поэтому при пожаре такой гипсовый защитный слой одновременно играет активную роль за счет поглощения значительного количества тепла и выполняет пассивную функцию в качестве экрана, препятствующего прохождению теплового потока.

Гипс можно использовать либо в виде сборных плиток или пластин,

либо наносить его вручную или механически (например, путем набрызга). На рис. 4.4 приведены три примера использования гипса для защиты металлических конструкций.

**4.2.1.3. Вермикулит.** Вермикулит представляет собой природный минерал из семейства гидрослюд, который при нагреве значительно увеличивается в объеме, обезвоживается и изменяет свою структуру на слоистую. Все это обуславливает его применение в качестве теплоизоляционного материала. Размер зерен вермикулита увеличивается в 20—30 раз, обезвоженный воздух оказывается в порах его структуры, которая сама обладает высокой теплоизолирующей способностью.

Наличие слюды в минеральном составе и очень высокая температура плавления (около 1400 °С) делают вермикулит материалом, весьма пригодным для производства защитных панелей, не выделяющих ни дыма, ни токсичных газов, а только лишь водяной пар. Сочетание цемента или гипса с вермикулитом позволяет создавать защитные оболочки, обладающие высокой огнестойкостью.

При смешивании вермикулита с глиноземистым цементом получается жароупорный бетон, постоянно выдерживающий температуру 1000 °С. Изделия из такого бетона могут быть монолитными или сборными, кроме того, бетон можно наносить набрызгом для образования защитного слоя.

Вермикулитовый бетон представляет собой защитное покрытие, весьма чувствительное к ударам, поэтому иногда возникает необходимость предохранять вермикулитовые защитные панели от повреждения (рис. 4.5).

**4.2.1.4. Перлит.** Как и вермикулит, перлит представляет собой минеральный заполнитель, обладающий способностью вспучиваться при действии тепла и, следовательно, находящий аналогичное применение.

**4.2.1.5. Минеральные волокна.** К числу минеральных волокон обычно относят: асбестовое волокно, стекловолокно или стекловату, шлаковое волокно или шлаковату.

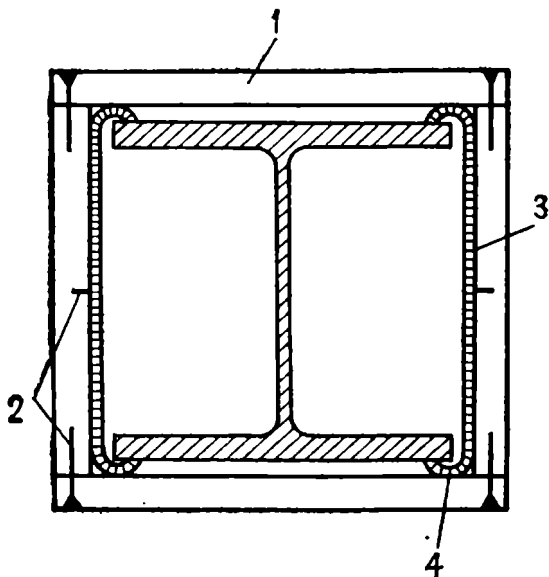
Асбестовое волокно представляет собой естественное волокно, достаточно часто встречаемое в природе.

Шлаковату чаще всего вырабатывают из доменных шлаков. В расплавленный шлак добавляют определенные компоненты с целью получения специальных свойств конечного продукта.

Процесс получения стекловолокна предусматривает плавление специальных стеклообразующих составов, способных к образованию волокнистой структуры. Все эти материалы набрызгивают пневматическим способом. Однако в настоящее время выпускают специальные защитные плитки, получаемые в результате их пропитки небольшим количеством термотвердеющих смол.

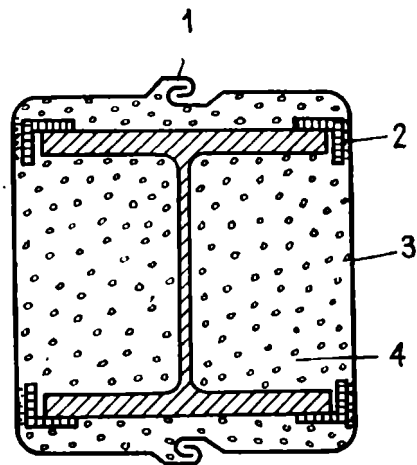
Применение асбестового волокна больше не практикуется, так как контакт с асбестом ведет к профессиональным заболеваниям (асбестоз, пневмокониоз). Согласно постановлению от 29 июня 1977 г., применение асбеста или асбестосодержащих материалов запрещается для устройства защитных покрытий на всех стеновых и прочих элементах жилых зданий. Асбестовое волокно находит применение лишь в асбестоцементных плитках, которые получают путем добавки заполнителей вулканического происхождения, кремнезема и цемента к некоторым отборным сортам асбеста. Такие плитки не подвергаются гниению, они не горят и не выделяют ни дыма, ни токсичных газов в случае пожара.

**4.2.1.6. Вспученная глина (керамзит) [4.1]. С в о й с т в а.** Это очень легкий и инертный материал, который состоит из зерен диаметром 3—10 мм, имеющий внутреннюю ячеистую остеклованную и прочную наружную оболочку, что обеспечивает его высокую прочность на сжатие при очень малой кажущейся плотности (около 350 кг/м<sup>3</sup>). Удобство применения такого материала в рассыпном виде заключается в том, что он вызывает минимальные поперечные усилия при укладке его между защищаемым элементом и листовой оболочкой. При нагреве листовой оболочки примерно до 300 °С шарики из вспученной глины не подвергаются осадке. В связи с этим в защитном слое не образуется местных пустот, которые могли бы способствовать повыше-



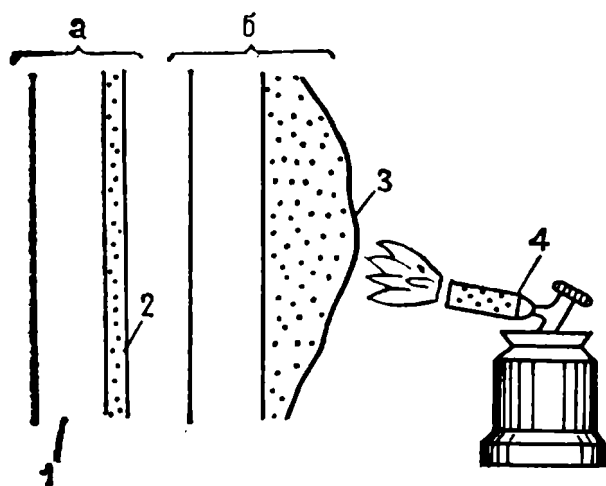
**РИС. 4.6. ПРИМЕР УСТАНОВКИ АСБЕСТОЦЕМЕНТНЫХ ЗАЩИТНЫХ ЛИСТОВ**

1 — асбестоцементный лист; 2 — крепежный винт; 3 — ребро жесткости; 4 — приваренная скоба



**РИС. 4.7. ЗАЩИТА СТАЛЬНОЙ КОЛОННЫ КЕРАМЗИТОМ**

1 — стык металлических листов кожуха; 2 — уголок; 3 — лист из обычной или нержавеющей стали; 4 — гранулы керамзита



**РИС. 4.8. НАНЕСЕНИЕ ВСПУЧИВАЮЩЕГОСЯ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ ДО ВОЗДЕЙСТВИЯ ОГНЯ (а) И В ПРОЦЕССЕ ЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ (б)**

1 — металлическая основа; 2 — вспучивающееся покрытие; 3 — образование «безе»; 4 — источник тепла

нию теплопередачи. Такой наполнитель сохраняет свою стойкость при температурах до  $1200^{\circ}\text{C}$ , являясь при этом плохим проводником тепла.

**Примечание.** Наружную оболочку создают, как правило, с помощью фальцевых соединений листов из обычной или нержавеющей стали, причем элементы листовой оболочки, включая устройство фальцев, можно изготавливать непосредственно на строительной площадке перед укладкой защитного слоя.

После установки защитного кожуха на предохраняемый элемент сверху засыпают зерна керамзита (рис. 4.7). Защитный кожух может быть также выполнен из асбестоцементных листов.

**4.2.1.7. Дерево.** Может показаться удивительной защита негорючей стали столь легко возгораемым и горючим материалом, как дерево. Однако высокие изоляционные свойства дерева превышают увеличение тепловой нагрузки, вызываемой таким способом изоляции. Таким образом возможно достичь предела огнестойкости порядка 60 мин с учетом скоростей горения, указанных в гл. 6.

**4.2.1.8. Вспучивающиеся покрытия и краски.** В качестве вспучивающихся покрытий используют побочные продукты производства

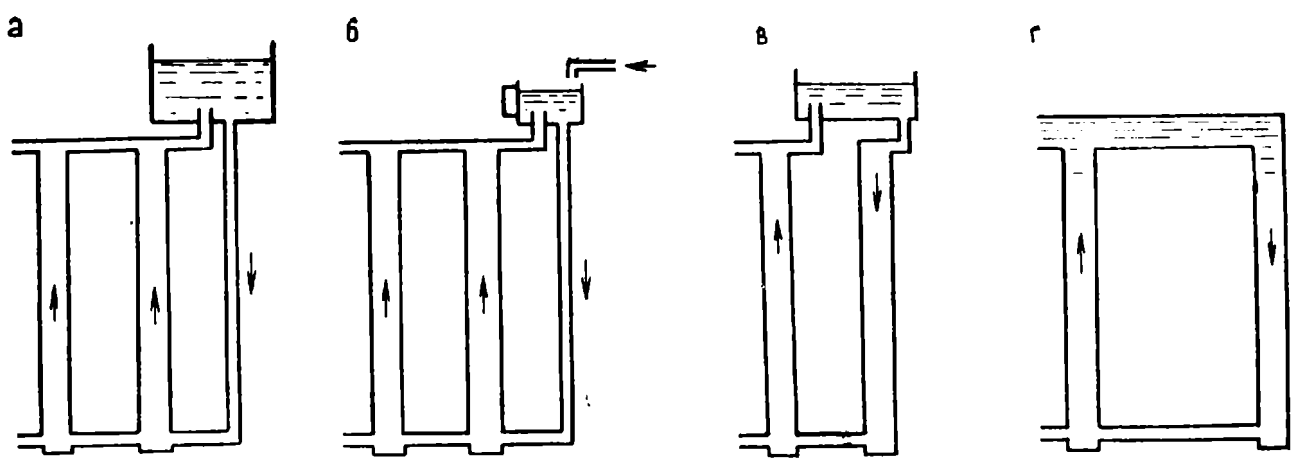


РИС. 4.9

целлюлозы, которые при наличии вспучивающего и органического вяжущего компонентов под действием тепла превращаются в пену, по консистенции напоминающую «безе». Это явление схематически представлено на рис. 4.8. Применение вспучивающихся окрасок требует весьма тщательной очистки и обезжиривания поверхности металла. За исключением ряда частных случаев (см. разд. 4.3 и 4.4) вспучивающаяся окраска позволяет получить огнестойкость порядка 0,5 ч.

Вспучивающуюся окраску весьма трудно использовать для защиты металлических элементов с малой тепловой инерцией. Кроме того, их поведение во времени и стойкость против атмосферных воздействий изучены крайне недостаточно, в связи с чем может возникнуть необходимость их обновления или замены. Однако недавние исследования [4.5] показали, что свойства вспучивающихся окрасок со временем улучшаются, в связи с чем как атмосферные воздействия, так и разрушение защитного слоя не являются в данном случае опасными явлениями.

#### 4.2.2. Особые методы защиты.

**4.2.2.1. Колонны полого сечения, заполненные бетоном.** Этот метод защиты заключается в использовании внутреннего объема полых профилей путем заполнения их армированным бетоном. Поэтому в данном случае речь может идти не о стальной, а о смешанной —сталежелезобетонной колонне, поскольку бетон воспринимает часть приложенной к колонне нагрузки. Более подробно этот метод рассматривается в гл. 5.

**4.2.2.2. Водонаполненные конструкции.** Принцип водяного охлаждения весьма прост и с успехом используется на протяжении десятилетий в различных областях техники. Как схематически показано на рис. 4.9, металлические колонны полого сечения поверху и понизу объединены в замкнутую сеть и заполнены водой. Уровень воды поддерживается постоянным с помощью вышерасположенного резервуара, который одновременно является компенсатором при увеличении объема воды и источником испарения. Если во время пожара такие колонны нагреваются, то в системе за счет подъема нагретой в отдельных местах воды устанавливается естественная циркуляция, с помощью которой удаляется приток тепла и происходит охлаждение стальной конструкции в очаге пожара. Достижение нагретой водой температуры кипения и ее испарение зависят главным образом от длительности и

размеров пожара, а также от количества циркулирующей в системе воды. За счет испарения происходит понижение уровня воды в резервуаре, причем питание системы может производиться либо из резервуара достаточно большой емкости (рис. 4.9, а), либо из внешнего источника (рис. 4.9, б). Таким образом, вся система колонн остается полностью заполненной водой на протяжении всего пожара, а достаточное удаление тепла от нагретых стальных элементов при достижении температуры кипения воды обеспечивается за счет охлаждения при испарении. Такой резервуар для хранения воды и испарения может быть непосредственно введен в систему циркуляции через специальный стояк, как показано на рис. 4.9, а, б. Если охлажденная вода возвращается в резервуар по колонне, не подверженной воздействию огня, то от специального стояка можно отказаться (рис. 4.9, в). Наконец, роль верхнего резервуара может также выполнять верхний элемент полого сечения соответствующих размеров, что приводит к образованию рамной конструкции, состоящей из колонн и ригелей с водяным охлаждением (рис. 4.9, г) [4.3].

Предотвратить замерзание воды в полых наружных колоннах можно с помощью добавки соответствующего антифриза. Внутренней коррозии колонн можно избежать с помощью добавки небольших количеств ингибитора коррозии.

Для внутренних колонн можно полностью отказаться от добавок антифриза в случае, если температура в помещении и, следовательно, температура воды в колоннах не опустится ниже точки замерзания воды.

Основная идея такого вида противопожарной защиты путем водяного охлаждения уже далеко не нова. Еще в 1884 г. американец Дж. Райт запатентовал применение чугунных колонн с водяным охлаждением для защиты зданий от пожара. Во Франции аналогичный патент был выдан П. Мюльтену лишь в 1960 г.

Таким образом, может быть достигнута неограниченная огнестойкость при условии правильного протекания процесса циркуляции и испарения жидкости. Кроме того, такая система может служить средством для создания искусственного климата в помещении, как это имело место при разработке системы кондиционирования воздуха конторского здания и плавательного бассейна в ФРГ.

Некоторые элементы расчета нагрева водонаполненных конструкций приведены в разд. 4.3.3.4.

**4.2.2.3. Экранная защита [4.20].** Экраны бывают двух типов — вертикальные и горизонтальные или наклонные (потолок, подшивка кровли).

**В е р т и к а л ь н ы й э к р а н.** Для защиты от огня расположенного внутри здания каркаса можно использовать перегородки. Надежный экран можно создать путем постановки перегородок по обе стороны от защищаемого элемента каркаса (рис. 4.10).

При устройстве защитного экрана из элементов стандартных размеров (например, древесно-стружечные, древесно-волокнуистые или гипсовые плиты) особое внимание должно быть обращено на выполнение вертикальных швов и на сопряжение их с горизонтальными эле-

ментами перекрытий, поскольку именно указанные места являются причиной ограниченной огнестойкости.

Аналогичным образом наличие дверной или оконной рамы может значительно снизить эффективность перегородки либо вследствие ее плохого крепления к элементам экрана, либо вследствие ее чрезмерной деформативности.

Воздушное пространство, образующееся при установке экрана с обеих сторон элемента каркаса, должно быть изолировано как в вертикальном, так и в горизонтальном направлении во избежание распространения огня за счет эффекта тяги.

Приняв такие меры предосторожности, можно выбрать тип перегородок с пределом огнестойкости, равным требуемому пределу огнестойкости каркаса при условии, что обращенная к огню перегородка сохраняет свои функции на всем протяжении пожара.

В этом случае температурный градиент будет примерно соответствовать схеме, представленной на рис. 4.11 (стойка защищена двумя экранами класса CF с огнестойкостью 1 ч), поэтому средняя температура колонны будет ниже ее критической температуры (см. разд. 4.4).

В случае, когда элемент каркаса несколько выступает из плоскости стены и к нему примыкает кирпичная перегородка, полки этого элемента каркаса защищают соответствующим слоем с помощью штукатурной сетки, используемой для улучшения сцепления защитного материала (рис. 4.12).

**Г о р и з о н т а л ь н ы й и н а к л о н н ы й э к р а н ы.** Речь идет об использовании декоративного элемента, каковым является подвесной потолок. Защита металлических конструкций осуществляется одновременно за счет изолирующей способности самого подвесного потолка и за счет воздушного пространства между подвесным потолком и плитой перекрытия или покрытия, опирающейся на защищаемую стальную балку (рис. 4.13).

Защита может оказаться весьма эффективной при условии соблюдения ряда требований. В частности, потолок не должен быть демонтируемым (сборно-разборным), а также не должен выделять токсичных газов. Кроме этого, необходимо предусмотреть вертикальное членение пространства между потолком и перекрытием (покрытием) во избежание распространения огня в горизонтальном направлении.

Поскольку официальные классификационные испытания предусматривают проверку степеней огнестойкости CF и PF всей конструкции (балка, плита, подвесной потолок), можно принять для подвесного потолка степень огнестойкости PF, равную степени SF, необходимой для балок, если выполнены указанные выше требования.

**4.2.2.4. Наружные конструкции.** Оригинальный и эффективный метод защиты заключается в вынесении вертикальных несущих конструкций наружу за ограждающие конструкции; при этом несущий каркас отдалается от источника пожара внутри здания, а стеновые ограждения выполняют функции вертикального экрана.

В этих условиях можно значительно уменьшить, а в отдельных случаях и совсем исключить нанесение защитных слоев на несущие конструкции (см. разд. 4.5).

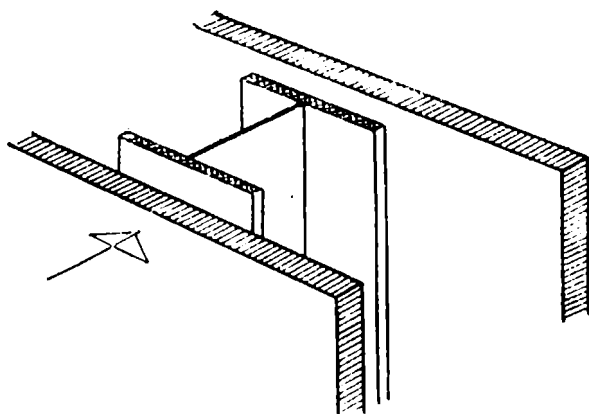


РИС. 4.10

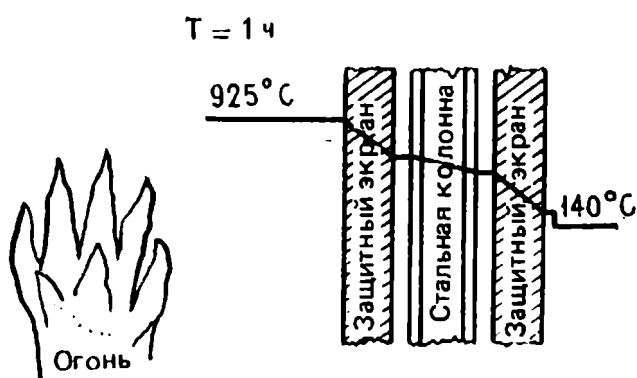


РИС. 4.11

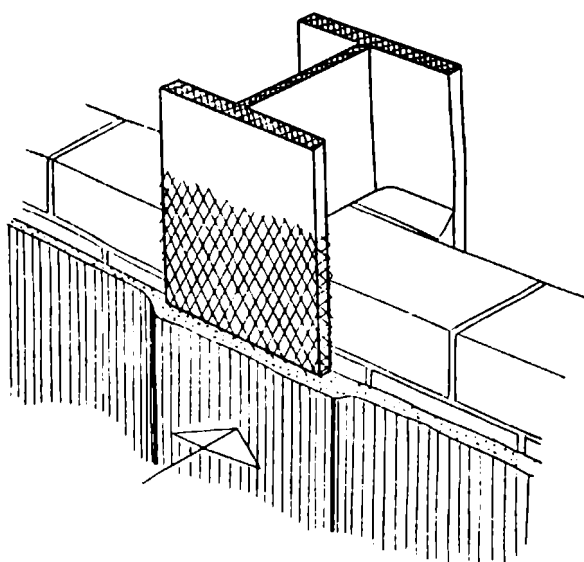


РИС. 4.12

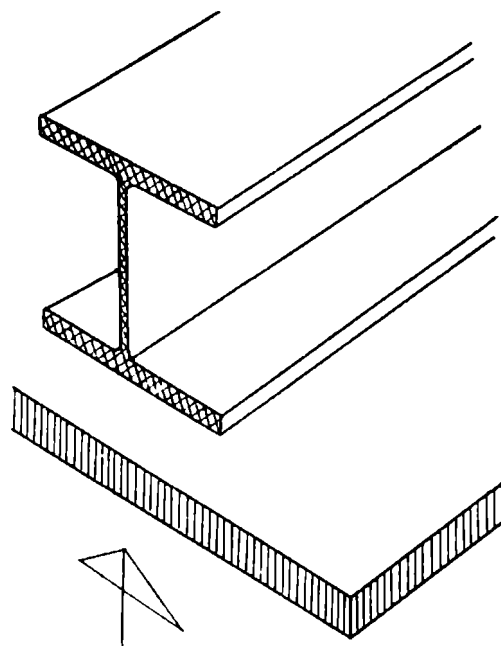


РИС. 4.13

4.2.2.5. Системы автоматического пожаротушения. Их применяют главным образом как средство борьбы с огнем, но в некоторых случаях можно использовать для охлаждения несущих конструкций.

Речь идет о системе устройств для разбрызгивания воды — спринклерах, расположенных в уровне потолка и находящихся в закрытом положении благодаря наличию плавких предохранителей. По мере повышения температуры спринклеры один за другим начинают действовать, причем вся система подачи воды под давлением должна быть рассчитана с учетом необходимости питания всех устройств, предназначенных для защиты каркаса. Для повышения эффективности охлаждения несущих конструкций система автоматического пожаротушения должна иметь специальные устройства, обеспечивающие бесперебойную подачу достаточного количества воды на защищаемые элементы. Например, для опрыскивания колонны двутаврового сечения следует предусмотреть систему, состоящую не менее чем из четырех спринклеров, подающих воду на полки и стенку. Может быть также предусмотрено орошение из кольцеобразной спрыскивающей головки. В разд. 4.3.5 читатель найдет расчет потребности воды для такой системы.

## 4.3. НАГРЕВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

**4.3.1. Введение и гипотезы.** Нагрев металлических конструкций в условиях пожара зависит от множества факторов, среди которых основными являются интенсивность огня и способы защиты металлоконструкций. Очевидно, что характер нагрева в условиях реального и стандартного пожаров будет весьма различным. В первом случае резкое повышение температуры горючих материалов (после воспламенения) является в общем случае довольно кратковременным и не оказывает существенного влияния на температуру металла вследствие его тепловой инерции. Поэтому металл подвергается нагреву, более медленному и менее значительному, чем нагрев окружающего воздуха. Во втором случае, когда интенсивность огня поддерживается за счет постоянной подачи горючих материалов, температура окружающей среды не перестает повышаться. Температура металла при этом оказывается лишь на несколько десятков градусов меньше температуры в очаге пожара, если не считать первых минут пожара, когда тепловая инерция металла обуславливает некоторую задержку нагрева, которая затем быстро нагоняется.

Очевидно, также, что наличие защиты металлического элемента или само его расположение относительно очага пожара оказывают значительное влияние на характер его нагрева.

Поэтому в целом проблема оказывается очень сложной, поскольку в этом случае необходимо рассматривать по отдельности каждый элемент конструкции под действием тепловой нагрузки, имеющей случайный характер, ибо именно таким характером отличается и сам пожар. В связи с этим к ее решению можно подходить лишь с помощью некоторых упрощающих гипотез, главная из которых состоит в том, что рассматриваемый металлический элемент находится в среде, имеющей одинаковую температуру по своему объему в любой момент времени. Кроме того, высокая температуропроводность стали (рис. 4.14) позволяет предполагать, что перенос тепла в массе металла является равномерным и мгновенным. Поэтому применительно к металлу не следует вводить понятия температурного градиента ни по сечению, ни по длине элемента.

Однако трудность состоит в том, что неоднородный нагрев металлического элемента может быть обусловлен не только самим пожаром, но и наличием защиты у этого элемента, которая либо предусмотрена сознательно (см. разд. 4.2), либо оказывается непредусмотренной и объясняется особым положением металлического элемента (например, балка, поддерживающая плиту, или стойка, заделанная в перегородку или примыкающая к ограждающей конструкции, и т. п.).

Эту трудность в данном случае можно частично устранить с помощью коэффициента массивности, характеризующего одновременно размеры металлического элемента, способ его защиты и характер его нагрева. Поэтому указанный коэффициент будет входить в формулы, которые нам предстоит вывести. В общем случае его определяют как отношение обращенной к огню поверхности  $S$  к объему стали на единицу элемента и, следовательно, выражается в  $\text{м}^{-1}$ .

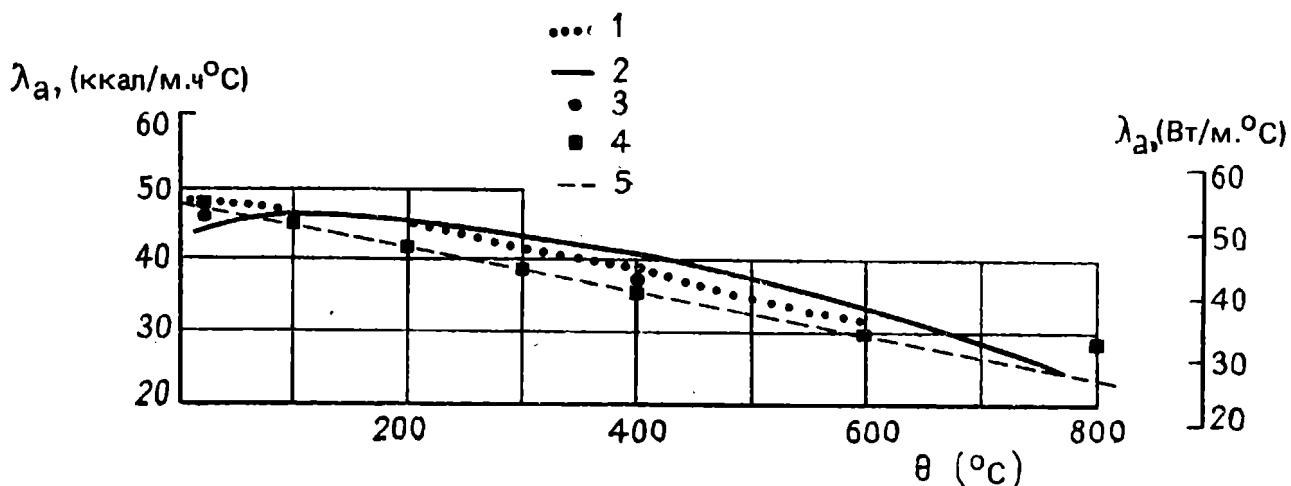


РИС. 4.14. ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ СТАЛИ [4.4]

1 — по данным ОТУА (Техническое бюро по использованию стали, Франция); 2 — по Скиннеру; 3 — по данным «Бабкок атлантик»; 4 — по данным «Справочника по теплопередаче» (Handbook of heat transfer); 5 — рекомендуемая зависимость

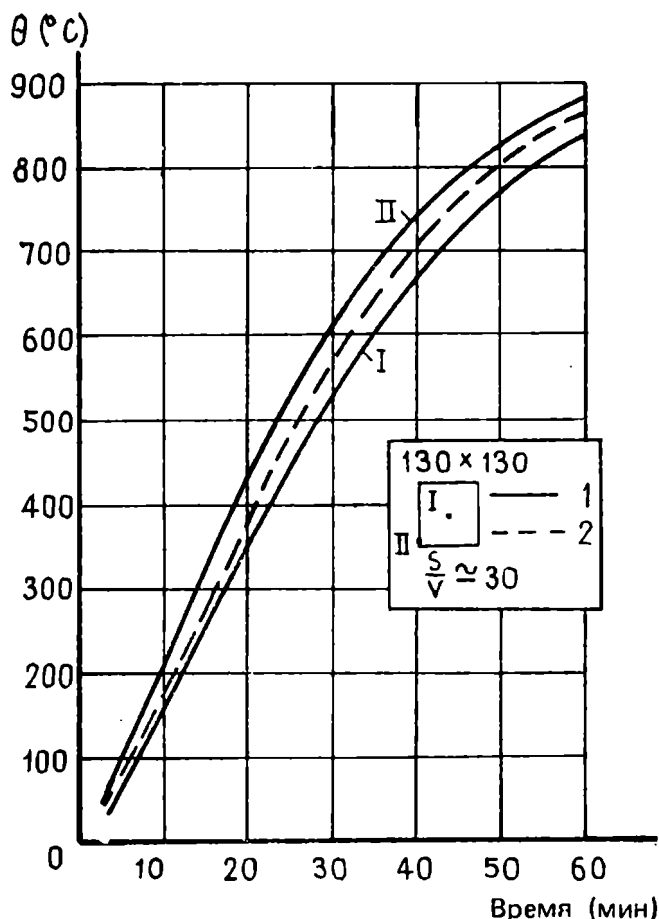


РИС. 4.15. СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПУТЕМ РАСЧЕТА НАГРЕВА, ОСНОВАННОГО НА ПРЕДПОЛОЖЕНИИ О МГНОВЕННОЙ И РАВНОМЕРНОЙ ПЕРЕДАЧЕ ТЕПЛА, И НА ОСНОВЕ ДВУМЕРНОГО АНАЛИЗА ПО МЕТОДУ КОНЕЧНЫХ РАЗНОСТЕЙ [4.4]

1 — по данным двумерного анализа; 2 — по формуле [4.3]

Однако рассматриваемая гипотеза приводит к ошибочным результатам при использовании очень массивных профилей, т. е. имеющих коэффициент массивности менее  $30 \text{ м}^{-1}$ . Для таких профилей разница между нагревом, вычисленным по только что изложенному методу, и предельными кривыми, соответствующими наиболее горячей и наиболее холодной точкам, вычисленным на основе двумерного анализа, превышает 10% (рис. 4.15). Это ограничение не влечет за собой сколько-нибудь серьезных практических последствий, ибо профили с коэффициентом массивности менее  $30 \text{ м}^{-1}$  применяют очень редко и серийно не выпускают. В качестве примера укажем лишь, что незащищенный и равномерно нагреваемый профиль НЕМ 600 имеет коэффициент массивности  $65,2 \text{ м}^{-1}$ , т. е. представляет собой, по существу, толстостенный профиль.

В прил. 2 к настоящей главе читатель найдет коэффициенты массивности основных типов профилей в зависимости от вида их защиты.

**4.3.2. Нагрев незащищенных элементов.** С учетом упомянутых гипотез нагрев незащищенного металлического профиля зависит только от его коэффициента массивности. Закон его нагрева можно получить, приравнявая в любой момент времени  $t$  проходящий через профиль тепловой поток  $\Phi$  (пропорциональный поверхности  $S$ ) и поглощаемое металлом количество тепла (пропорциональное объему  $V$ ), т. е.

$$\Phi = K (\theta_f - \theta_a) \quad (4.1)$$

в предположении равенства температур на поверхности и в теле металла и

$$\Phi S \Delta t = V C_{p_a} \rho_a \Delta \theta_a, \quad (4.2)$$

откуда

$$\Delta \theta_a = K \frac{S}{V} \frac{1}{C_{p_a} \rho_a} (\theta_f - \theta_a) \Delta t. \quad (4.3)$$

В этой формуле  $K$  — полный коэффициент теплопереноса, определяемый по приближенной формуле

$$K = 20 + 3 \cdot 10^{-8} (T_f^2 + T_a^2) (T_f + T_a) \text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}), \quad (4.4)$$

$C_{p_a}$  и  $\rho_a$  — соответственно массовая удельная теплоемкость и плотность, стали;

$$C_{p_a} = 9,1 \cdot 10^{-8} \theta_a^2 + 4,8 \theta_a + 0,113 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}); \quad (4.5)$$

$$\rho_a = 7850 \text{ кг}/\text{м}^3,$$

где  $\theta_f$  и  $\theta_a$  — температура среды и стали,  $^\circ\text{C}$ ;  $\Delta t$  и  $\Delta \theta_a$  — приращения времени, ч, и температура стали,  $^\circ\text{C}$ ;  $T_f$  и  $T_a$  — температура среды и стали,  $\text{K}$ .

На основании такого закона нагрева составлена табл. 4.1, в которой непосредственно даны температуры металлического элемента при стандартном пожаре в функции отношения  $S/V$  для интервалов времени от 2 до 30 мин.

Интервалы времени, превышающие 30 мин, в таблице не предусмотрены, ибо в подавляющем большинстве случаев незащищенные конструкции обрушиваются раньше (см. разд. 4.4).

**4.3.3. Нагрев защищенных профилей.** Помимо отношения  $S/V$  нагрев защищенных профилей зависит от характера переноса тепла (конвекция, излучение, теплопроводность), а также от геометрических, физических и термических свойств защитного материала. При условии пренебрежения влиянием характера поверхности защитного материала на излучение и конвекцию защитные свойства материала определяются одновременно его теплопроводностью, массовой удельной теплоемкостью и плотностью, характеризующими его температуропроводностью  $a = \lambda / C_p \rho$ . Более того, многие вещества (например, гипс) содержат значительное количество воды, интенсивное испарение которой замедляет нагрев металлического элемента. В защитных материалах могут также происходить эндотермические реакции разложения. Наконец, применение вспучивающихся покрытий и красок делает механизм реакции на огонь очень сложным (образование «безе») и плохо поддается расчету.

Таблица 4.1

| $S/V$<br>$t, \text{ мин}$ | 50  | 75  | 100 | 125 | 150 | 175 | 200 | 225 | 250 | 275 | 300 | 325 | 350 | 375 | 400 |
|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 2                         | 36  | 45  | 53  | 61  | 69  | 76  | 84  | 92  | 100 | 107 | 115 | 123 | 130 | 136 | 145 |
| 4                         | 72  | 97  | 121 | 144 | 167 | 189 | 209 | 230 | 247 | 267 | 285 | 302 | 313 | 334 | 349 |
| 6                         | 117 | 161 | 203 | 241 | 277 | 310 | 340 | 368 | 394 | 417 | 437 | 457 | 474 | 489 | 503 |
| 8                         | 167 | 231 | 288 | 338 | 383 | 421 | 455 | 485 | 510 | 531 | 549 | 564 | 577 | 587 | 596 |
| 10                        | 221 | 302 | 370 | 428 | 476 | 516 | 547 | 572 | 593 | 609 | 622 | 632 | 639 | 646 | 650 |
| 12                        | 275 | 371 | 447 | 507 | 554 | 589 | 616 | 636 | 651 | 662 | 670 | 676 | 680 | 684 | 687 |
| 14                        | 330 | 436 | 515 | 574 | 616 | 646 | 666 | 681 | 691 | 698 | 703 | 707 | 710 | 712 | 714 |
| 16                        | 383 | 496 | 575 | 629 | 665 | 688 | 703 | 714 | 721 | 726 | 729 | 732 | 734 | 735 | 737 |
| 18                        | 433 | 550 | 626 | 673 | 703 | 721 | 732 | 740 | 745 | 748 | 750 | 752 | 754 | 755 | 756 |
| 20                        | 482 | 598 | 668 | 709 | 733 | 747 | 755 | 760 | 764 | 767 | 768 | 770 | 771 | 772 | 773 |
| 22                        | 527 | 641 | 704 | 739 | 757 | 768 | 774 | 778 | 781 | 783 | 784 | 785 | 786 | 787 | 788 |
| 24                        | 568 | 678 | 734 | 763 | 777 | 785 | 790 | 793 | 796 | 797 | 799 | 800 | 801 | 801 | 802 |
| 26                        | 607 | 710 | 759 | 783 | 794 | 801 | 805 | 807 | 809 | 811 | 812 | 813 | 813 | 814 | 815 |
| 28                        | 642 | 738 | 781 | 800 | 809 | 814 | 817 | 819 | 821 | 823 | 824 | 825 | 825 | 826 | 826 |
| 30                        | 674 | 762 | 799 | 815 | 822 | 826 | 829 | 831 | 833 | 834 | 835 | 835 | 836 | 837 | 837 |

В связи с этим с точки зрения расчета нагрева следует различать три типа защиты: так называемыми «сухими» веществами, так называемыми «мокрыми» веществами и вспучивающимися веществами.

Мокрые и сухие вещества различают на основе оценки кривой температура—время, зафиксированной при испытании защищенного профиля на нагрев. Мы будем называть вещество мокрым, если указанная кривая при температуре порядка 100 °С имеет выраженную площадку фазового перехода. В противном случае вещество будем считать сухим<sup>1</sup>. Отметим, что такое определение никоим образом не предопределяет количество воды, содержащейся в материале, будь то вода затворения или химически связанная вода. Разницу между двумя видами кривой температура—время можно уяснить из рис. 4.16: применение защитного материала, представляющего собой смесь гипса, извести и вермикулита, ведет к получению ярко выраженной площадки выпаривания, в то время как применение только вермикулита в качестве защитного материала вызывает отсутствие какой-либо площадки на кривой нагрева [4.5]. Отметим, что толщина защитного слоя составляла 34 мм на полках и 30 мм на стенке, а толщина панелей была 30 мм.

**4.3.3.1. Сухие защитные материалы.** Изолирующие свойства материала зависят от его объемной удельной теплоемкости, которая представляет собой произведение массовой удельной теплоемкости  $C_p$  на плотность  $\rho$ , и теплопроводности  $\lambda$ . Разумеется, эти величины зависят от температуры  $\theta$ , поэтому защитный материал характеризуется тремя кривыми  $C_p - \theta$ ;  $\rho - \theta$  и  $\lambda - \theta$ . Кроме того, излучение на за-

<sup>1</sup> Этот вопрос является спорным, так как температура фазового перехода механически связанной воды в пар зависит от радиуса пор и капилляров, в которых она находится. (Примеч. науч. ред.)

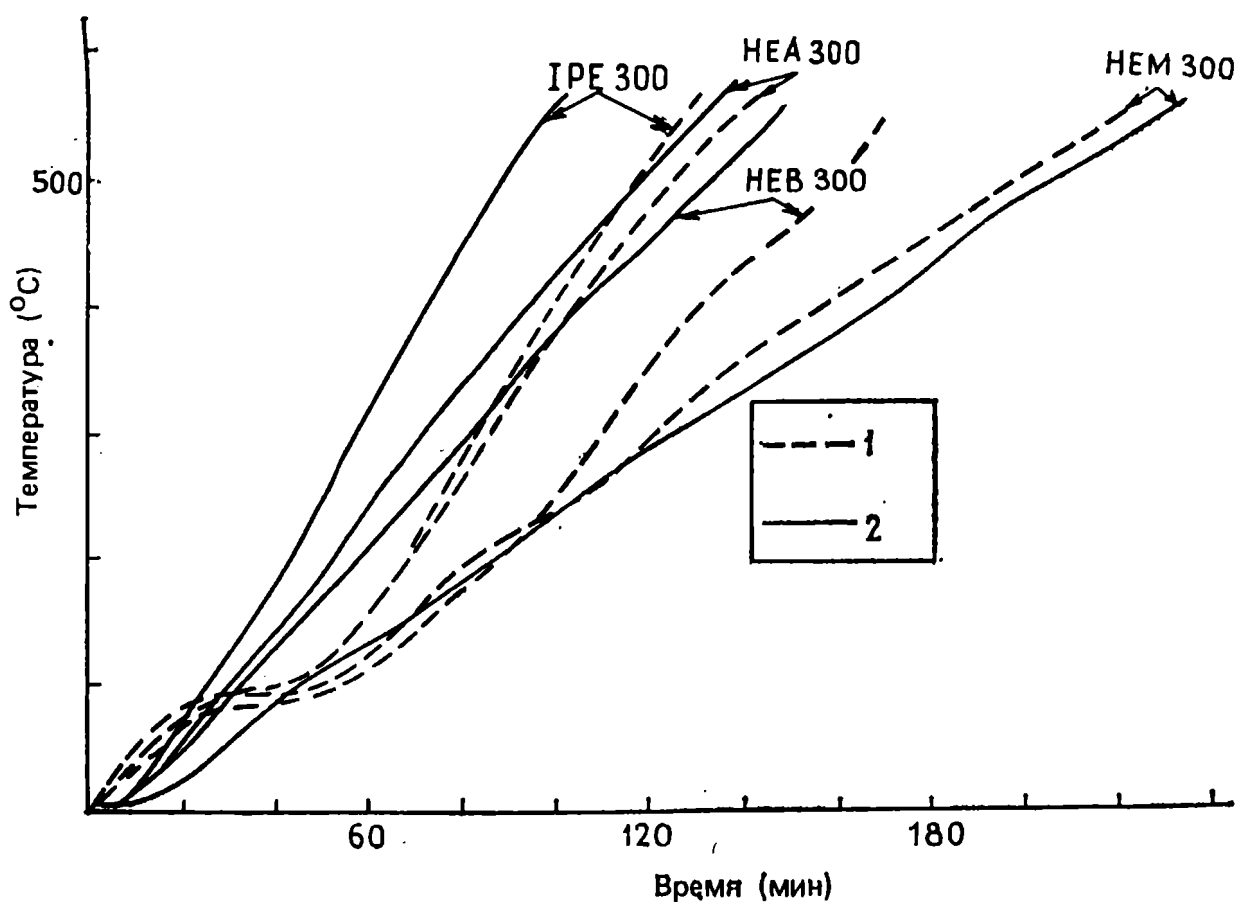


РИС. 4.16

1 — штукатурный слой из смеси гипса, извести и вермикулита; 2 — панель из вермикулита

щищаемой поверхности зависит от вида материала и способа его нанесения. Таким образом, теплофизические свойства материалов могут быть сведены к одному коэффициенту, который мы назовем коэффициентом «условной теплопроводности» и обозначим  $\gamma$ . Тогда термическое сопротивление защитного слоя, имеющего среднюю толщину  $e$ , составляет  $e/\gamma$ . Рассуждая так же, как и в случае незащищенных профилей (разд. 4.3.2), получим формулу

$$\Delta\theta_a = \frac{1}{1/K + e/\gamma} \frac{S}{V} \frac{1}{C\rho_a} (\theta_f - \theta_a) \Delta t. \quad (4.6)$$

Коэффициент  $\gamma$ , как и его компоненты, является функцией температуры. Кроме того, формула (4.6) теряет всякий физический смысл, когда при увеличении защитного слоя объемная удельная теплопроводность материала начинает превалировать над теплопроводностью. Поэтому формулу следует скорректировать с тем, чтобы учесть это изменение в зависимости от толщины защитного слоя. В связи с этим пользоваться формулой следует с осторожностью. Для разных защитных материалов разработаны графики, приведенные в прил. 1 к настоящей главе. Для четырех фиксированных периодов (30, 60, 90 и 120 мин) эти графики дают температуру стали в зависимости от массивности профиля и толщины защитного слоя.

**4.3.3.2. Мокрые защитные материалы.** Расчет автоматически разбивается на три части: до, во время и после площадки фазового перехода воды в пар (испарения), которая имеет место на кривой нагрева при температуре около 100 °С, причем продолжительность этой пло-

щадки во времени зависит от влажности  $p$  материала (здесь  $p$  — в % по объему).

До площадки испарения тепловой поток служит для нагрева металла, защитного материала и содержащейся в нем воды. Отсюда вытекает формула

$$\Delta\theta_a = \frac{1}{\frac{1}{K} + \frac{e}{2\gamma}} \frac{\theta_f - \theta_a}{\frac{Cp_a \rho_a}{S/V} + 1000pe} \Delta t. \quad (4.7)$$

На стадии прохождения площадки тепловой поток служит лишь для выпаривания воды, скрытая теплота парообразования которой составляет  $5,4 \cdot 10^5$  ккал/м<sup>3</sup>. Отсюда следует формула

$$5,4 \cdot 10^5 pe \left( \frac{1}{K} + \frac{e}{2\gamma} \right) = \int_{t_1}^{t_2} (\theta_f - 100) dt, \quad (4.8)$$

где  $t_1$  и  $t_2$  — время начала и конца площадки.

При выводе этих формул предполагается, что вода сосредоточена в середине толщины слоя защитного материала. После прохождения площадки защитный слой оказывается высушенным, и можно пользоваться формулой (4.6). Очевидно, к приведенным формулам имеются точно такие же критические замечания, что и к формулам в разделе 4.3.3.1.

**4.3.3.3. Вспучивающиеся покрытия и краски.** Поскольку для защитных покрытий такого рода еще не разработан сколь-нибудь простой метод расчета для определения степени нагрева защищенных таким образом металлических элементов, следует прибегать к экспериментам, на основе которых можно построить номограммы, аналогичные приведенным в прил. 1 к настоящей главе.

**4.3.3.4. Примечания.** Даже если остаются неизвестными зависимость теплофизических свойств защитного материала и коэффициент  $\gamma$  от температуры, можно тем не менее получить приблизительное значение максимальной температуры в металлическом элементе, если знать примерную величину теплопроводности материала. Такие примерные температурные максимумы приведены в табл. 4.2 для стандартного пожара и в табл. 4.3 для реального пожара.

На основании этих таблиц можно сделать вывод, что металлический элемент с коэффициентом массивности  $125 \text{ м}^{-1}$ , защищенный материалом, имеющим термическое сопротивление  $e/\lambda = 0,1 \text{ м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}/\text{ккал}$ , достигает температуры  $837^\circ\text{C}$  через 2 ч стандартного пожара и не более  $390^\circ\text{C}$  в условиях реального пожара, определяемого тепловой нагрузкой  $g = 20 \text{ Мкал на } 1 \text{ м}^2$  полной поверхности и коэффициентом проемности  $(A\sqrt{H})/A_t = 0,02 \text{ м}^{1/2}$  с учетом поправки на характер материала ограждающих конструкций (см. гл. 2).

Быстрый, но страдающий недостаточной точностью способ оценки свойств защитного материала на основе одного классификационного испытания основан на том, что нагрев конструкции возрастает с увеличением массивности и ослабляется с увеличением толщины защитного слоя.

Таблица 4.2. Максимальная температура стальной конструкции, °С, в зависимости от  $t$ ,  $\varphi$ , и  $S/V$ , м<sup>-1</sup>, для условий стандартного пожара

| $t$ , мин | $S/V$ |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|           | 50    | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |

а) Термическое сопротивление 0,05 м<sup>2</sup>·ч·°С/ккал

|     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 5   | 25  | 49  | 72  | 94  | 116 | 136 | 156 | 175 |
| 10  | 62  | 119 | 171 | 217 | 258 | 296 | 330 | 360 |
| 15  | 104 | 192 | 267 | 330 | 383 | 428 | 466 | 499 |
| 20  | 147 | 263 | 354 | 427 | 485 | 532 | 570 | 602 |
| 25  | 189 | 329 | 432 | 510 | 569 | 615 | 651 | 678 |
| 30  | 231 | 390 | 501 | 581 | 639 | 682 | 713 | 736 |
| 35  | 272 | 446 | 562 | 641 | 696 | 734 | 761 | 779 |
| 40  | 311 | 498 | 616 | 696 | 747 | 777 | 798 | 813 |
| 45  | 349 | 545 | 664 | 738 | 783 | 811 | 829 | 840 |
| 50  | 385 | 589 | 707 | 775 | 815 | 839 | 854 | 863 |
| 55  | 420 | 629 | 745 | 808 | 843 | 863 | 875 | 882 |
| 60  | 453 | 667 | 778 | 836 | 866 | 883 | 893 | 899 |
| 65  | 484 | 701 | 807 | 860 | 886 | 900 | 909 | 914 |
| 70  | 514 | 733 | 834 | 881 | 904 | 916 | 923 | 927 |
| 75  | 543 | 762 | 857 | 899 | 919 | 929 | 935 | 939 |
| 80  | 571 | 788 | 878 | 915 | 933 | 942 | 947 | 951 |
| 85  | 597 | 813 | 896 | 930 | 945 | 953 | 958 | 961 |
| 90  | 623 | 835 | 913 | 943 | 957 | 964 | 968 | 971 |
| 95  | 648 | 856 | 928 | 955 | 967 | 973 | 977 | 980 |
| 100 | 671 | 875 | 942 | 966 | 977 | 982 | 986 | 988 |
| 105 | 694 | 892 | 954 | 976 | 986 | 991 | 994 | 996 |
| 110 | 715 | 909 | 966 | 986 | 994 | 999 | —   | —   |
| 115 | 736 | 923 | 976 | 994 | —   | —   | —   | —   |
| 120 | 756 | 937 | 986 | —   | —   | —   | —   | —   |

б) Термическое сопротивление 0,1 м<sup>2</sup>·ч·°С/ккал

|     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 5   | 15  | 30  | 45  | 59  | 73  | 86  | 100 | 113 |
| 10  | 38  | 73  | 107 | 139 | 169 | 197 | 223 | 247 |
| 15  | 63  | 120 | 172 | 219 | 261 | 299 | 333 | 364 |
| 20  | 69  | 168 | 235 | 293 | 344 | 389 | 427 | 462 |
| 25  | 116 | 214 | 294 | 362 | 418 | 466 | 507 | 542 |
| 30  | 144 | 258 | 350 | 424 | 484 | 534 | 575 | 610 |
| 35  | 171 | 301 | 401 | 480 | 542 | 593 | 634 | 668 |
| 40  | 198 | 342 | 449 | 530 | 594 | 645 | 685 | 716 |
| 45  | 224 | 380 | 493 | 577 | 641 | 691 | 728 | 757 |
| 50  | 249 | 417 | 534 | 620 | 683 | 731 | 766 | 792 |
| 55  | 275 | 452 | 573 | 659 | 721 | 766 | 798 | 822 |
| 60  | 299 | 485 | 609 | 695 | 755 | 797 | 826 | 847 |
| 65  | 323 | 516 | 642 | 727 | 785 | 824 | 851 | 869 |
| 70  | 346 | 546 | 674 | 757 | 812 | 848 | 872 | 889 |
| 75  | 369 | 575 | 703 | 784 | 836 | 870 | 891 | 906 |
| 80  | 391 | 602 | 731 | 809 | 858 | 889 | 908 | 921 |
| 85  | 412 | 629 | 756 | 832 | 878 | 906 | 924 | 935 |
| 90  | 433 | 654 | 780 | 853 | 896 | 921 | 937 | 947 |
| 95  | 453 | 678 | 802 | 857 | 912 | 935 | 950 | 959 |
| 100 | 473 | 700 | 823 | 890 | 927 | 948 | 961 | 969 |
| 105 | 492 | 722 | 842 | 906 | 941 | 960 | 972 | 979 |
| 110 | 511 | 743 | 861 | 921 | 953 | 971 | 981 | 988 |
| 115 | 529 | 763 | 877 | 935 | 964 | 981 | 990 | 996 |
| 120 | 547 | 782 | 893 | 948 | 975 | 990 | 999 | —   |

| t, мин | S/V |     |     |     |     |     |     |     |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|        | 50  | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 |

в) Термическое сопротивление 0,2 м<sup>2</sup>·ч·°С/ккал

|     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 5   | 9   | 17  | 25  | 34  | 42  | 50  | 58  | 66  |
| 10  | 21  | 42  | 62  | 81  | 99  | 118 | 135 | 152 |
| 15  | 35  | 69  | 101 | 131 | 159 | 186 | 211 | 235 |
| 20  | 50  | 97  | 141 | 180 | 217 | 251 | 285 | 311 |
| 25  | 66  | 126 | 180 | 228 | 272 | 312 | 348 | 380 |
| 30  | 82  | 154 | 218 | 274 | 324 | 368 | 407 | 442 |
| 35  | 98  | 183 | 255 | 318 | 372 | 420 | 461 | 498 |
| 40  | 114 | 210 | 291 | 359 | 417 | 467 | 510 | 548 |
| 45  | 130 | 237 | 325 | 398 | 459 | 511 | 555 | 594 |
| 50  | 146 | 264 | 358 | 435 | 498 | 552 | 597 | 636 |
| 55  | 162 | 289 | 389 | 469 | 535 | 590 | 636 | 674 |
| 60  | 178 | 314 | 419 | 502 | 570 | 625 | 671 | 709 |
| 65  | 194 | 339 | 448 | 534 | 602 | 658 | 704 | 741 |
| 70  | 210 | 362 | 476 | 563 | 633 | 689 | 734 | 769 |
| 75  | 225 | 385 | 502 | 592 | 662 | 718 | 761 | 796 |
| 80  | 240 | 407 | 528 | 619 | 690 | 744 | 787 | 820 |
| 85  | 255 | 429 | 552 | 645 | 715 | 769 | 810 | 842 |
| 90  | 270 | 450 | 576 | 670 | 740 | 792 | 832 | 862 |
| 95  | 285 | 470 | 599 | 693 | 763 | 814 | 852 | 880 |
| 100 | 299 | 490 | 621 | 715 | 784 | 834 | 870 | 897 |
| 105 | 313 | 509 | 642 | 737 | 804 | 853 | 887 | 912 |
| 110 | 327 | 528 | 663 | 757 | 823 | 870 | 903 | 927 |
| 115 | 341 | 546 | 682 | 776 | 841 | 886 | 918 | 940 |
| 120 | 355 | 564 | 701 | 795 | 858 | 902 | 931 | 852 |

г) Термическое сопротивление 0,3 м<sup>2</sup>·ч·°С/ккал

|     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 5   | 6   | 12  | 18  | 24  | 29  | 35  | 41  | 46  |
| 10  | 15  | 29  | 43  | 57  | 70  | 84  | 97  | 109 |
| 15  | 24  | 48  | 71  | 93  | 114 | 135 | 154 | 173 |
| 20  | 35  | 68  | 100 | 130 | 158 | 185 | 210 | 234 |
| 25  | 46  | 89  | 129 | 167 | 201 | 234 | 264 | 292 |
| 30  | 57  | 110 | 158 | 202 | 243 | 280 | 314 | 345 |
| 35  | 68  | 131 | 187 | 237 | 283 | 324 | 361 | 395 |
| 40  | 80  | 152 | 215 | 271 | 312 | 365 | 405 | 441 |
| 45  | 92  | 172 | 242 | 303 | 357 | 404 | 446 | 484 |
| 50  | 103 | 193 | 269 | 334 | 391 | 441 | 485 | 523 |
| 55  | 115 | 213 | 295 | 364 | 424 | 476 | 521 | 560 |
| 60  | 127 | 232 | 320 | 393 | 455 | 508 | 555 | 595 |
| 65  | 139 | 252 | 344 | 421 | 485 | 540 | 587 | 628 |
| 70  | 150 | 271 | 368 | 447 | 513 | 569 | 617 | 659 |
| 75  | 162 | 289 | 391 | 473 | 540 | 598 | 646 | 687 |
| 80  | 173 | 308 | 413 | 497 | 567 | 625 | 673 | 714 |
| 85  | 185 | 326 | 435 | 521 | 592 | 650 | 699 | 740 |
| 90  | 196 | 343 | 455 | 544 | 616 | 675 | 724 | 763 |
| 95  | 208 | 360 | 476 | 566 | 639 | 698 | 746 | 786 |
| 100 | 219 | 377 | 495 | 588 | 661 | 721 | 768 | 806 |
| 105 | 230 | 394 | 515 | 608 | 683 | 742 | 789 | 826 |
| 110 | 241 | 410 | 533 | 628 | 703 | 762 | 808 | 844 |
| 115 | 252 | 426 | 551 | 648 | 723 | 781 | 826 | 861 |
| 120 | 262 | 441 | 569 | 667 | 742 | 799 | 843 | 878 |

Таблица 4.3а. Максимальная температура стальной конструкции, °С, в зависимости от  $q$ , ...,  $(A \sqrt{H}/A_t)$ ,...  $S/V$ , ...,  $e/\lambda$ , ..., для условий реального пожара (см. табл. 4.3, б)

| $q$        | $A\sqrt{h}$ | $S/V$ | $e/\lambda$ |     |     |     | $q$         | $A\sqrt{h}/A_t$ | $S/V$ | $e/\lambda$ |     |     |     | $q$         | $A\sqrt{h}/A_t$ | $S/V$ | $e/\lambda$ |     |     |     |
|------------|-------------|-------|-------------|-----|-----|-----|-------------|-----------------|-------|-------------|-----|-----|-----|-------------|-----------------|-------|-------------|-----|-----|-----|
|            |             |       | 0,05        | 0,1 | 0,2 | 0,3 |             |                 |       | 0,05        | 0,1 | 0,2 | 0,3 |             |                 |       | 0,05        | 0,1 | 0,2 | 0,3 |
| 15<br>{63} | 0,01        | 100   | 308         | 325 | 255 | 215 | 25<br>{105} | 0,01            | 50    | 430         | 360 | 275 | 230 | 35<br>{147} | 0,02            | 25    | 360         | 260 | 185 | 145 |
|            |             | 125   | 405         | 350 | 280 | 240 |             |                 | 75    | 470         | 410 | 330 | 275 |             |                 | 50    | 490         | 380 | 270 | 225 |
|            |             | 150   | 420         | 365 | 300 | 260 |             |                 | 100   | 495         | 445 | 370 | 320 |             |                 | 75    | 550         | 445 | 340 | 280 |
|            |             | 200   | 440         | 395 | 335 | 290 |             |                 | 125   | 505         | 465 | 395 | 350 |             |                 | 100   | 595         | 490 | 385 | 325 |
|            |             | 300   | 460         | 430 | 375 | 335 |             |                 | 150   | 515         | 480 | 420 | 375 |             |                 | 125   | 625         | 535 | 425 | 360 |
|            |             | 400   | 470         | 445 | 405 | 370 |             |                 | 200   | 525         | 500 | 450 | 410 |             |                 | 150   | 645         | 555 | 460 | 395 |
|            | 0,02        | 100   | 390         | 300 | 220 | 180 |             | 0,02            | 50    | 395         | 300 | 225 | 180 |             | 0,04            | 25    | 275         | 200 | 130 | 100 |
|            |             | 125   | 420         | 340 | 250 | 205 |             |                 | 75    | 455         | 360 | 280 | 230 |             |                 | 50    | 410         | 300 | 205 | 160 |
|            |             | 150   | 450         | 360 | 275 | 225 |             |                 | 100   | 500         | 405 | 310 | 260 |             |                 | 75    | 500         | 380 | 265 | 210 |
|            |             | 200   | 500         | 400 | 310 | 260 |             |                 | 125   | 540         | 445 | 350 | 300 |             |                 | 100   | 560         | 440 | 310 | 250 |
|            |             | 300   | 550         | 460 | 370 | 320 |             |                 | 150   | 560         | 470 | 375 | 320 |             |                 | 125   | 610         | 480 | 350 | 280 |
|            |             | 400   | 575         | 505 | 415 | 355 |             |                 | 200   | 595         | 515 | 420 | 360 |             |                 | 150   | 650         | 525 | 385 | 310 |
|            | 0,04        | 125   | 375         | 270 | 195 | 155 |             | 0,04            | 300   | 635         | 570 | 490 | 435 |             | 0,06            | 200   | 700         | 590 | 445 | 370 |
|            |             | 150   | 400         | 300 | 210 | 175 |             |                 | 400   | 650         | 605 | 525 | 470 |             |                 | 300   | 760         | 665 | 530 | 450 |
|            |             | 200   | 450         | 350 | 250 | 205 |             |                 | 75    | 400         | 295 | 200 | 160 |             |                 | 400   | —           | 710 | 585 | 510 |
|            |             | 300   | 550         | 420 | 310 | 255 |             |                 | 100   | 450         | 350 | 240 | 195 |             |                 | 50    | 350         | 250 | 165 | 125 |
|            | 0,06        | 150   | 350         | 250 | 175 | 140 |             | 0,06            | 125   | 510         | 380 | 270 | 220 |             |                 | 75    | 430         | 320 | 215 | 170 |
|            |             | 200   | 400         | 295 | 210 | 170 |             |                 | 150   | 550         | 420 | 300 | 250 |             |                 | 100   | 500         | 370 | 255 | 200 |
|            |             | 300   | 480         | 370 | 260 | 210 |             |                 | 200   | 600         | 480 | 350 | 290 |             |                 | 125   | 555         | 415 | 295 | 235 |
|            |             | 400   | 540         | 420 | 305 | 245 |             |                 | 300   | 680         | 555 | 425 | 365 |             |                 | 150   | 595         | 455 | 320 | 260 |
|            | 0,08        | 200   | 350         | 255 | 185 | 145 |             | 0,06            | 400   | 725         | 615 | 485 | 420 |             |                 | 200   | 660         | 520 | 380 | 305 |
|            |             | 300   | 425         | 335 | 225 | 180 |             |                 | 75    | 350         | 245 | 170 | 130 |             |                 | 300   | 750         | 610 | 465 | 380 |
|            |             | 400   | 500         | 390 | 270 | 200 |             |                 | 100   | 410         | 295 | 200 | 160 |             |                 | 400   | 800         | 675 | 530 | 440 |
|            | 0,12        | 300   | 330         | 250 | 175 | 140 |             | 0,06            | 125   | 455         | 330 | 230 | 185 |             |                 | 75    | 380         | 275 | 185 | 145 |
|            |             | 400   | 350         | 300 | 200 | 165 |             |                 | 150   | 500         | 370 | 255 | 205 |             |                 | 100   | 450         | 325 | 220 | 175 |
|            |             | 75    | 420         | 355 | 280 | 235 |             |                 | 200   | 565         | 430 | 310 | 245 |             |                 | 125   | 500         | 365 | 255 | 200 |
|            |             | 100   | 440         | 385 | 315 | 270 |             |                 | 300   | 655         | 520 | 380 | 305 |             |                 |       |             |     |     |     |
|            |             | 125   | 460         | 415 | 340 | 290 |             |                 | 400   | 710         | 580 | 440 | 360 |             |                 |       |             |     |     |     |



| Продолжение табл. 4.3а |               |     |              |     |     |     |             |                                   |     |              |     |     |     |
|------------------------|---------------|-----|--------------|-----|-----|-----|-------------|-----------------------------------|-----|--------------|-----|-----|-----|
| q                      | AV $\sqrt{h}$ | S/V | e/ $\lambda$ |     |     |     | q           | AV $\sqrt{h}$ /<br>A <sub>t</sub> | S/V | e/ $\lambda$ |     |     |     |
|                        |               |     | 0,05         | 0,1 | 0,2 | 0,3 |             |                                   |     | 0,05         | 0,1 | 0,2 | 0,3 |
| 20<br>{84}             | 0,01          | 150 | 475          | 430 | 365 | 320 | 30<br>{126} | 0,08                              | 100 | 350          | 255 | 175 | 140 |
|                        |               | 200 | 490          | 455 | 395 | 355 |             |                                   | 125 | 400          | 290 | 195 | 155 |
|                        |               | 300 | 500          | 480 | 440 | 400 |             |                                   | 150 | 450          | 325 | 220 | 175 |
|                        |               | 400 | 505          | 490 | 460 | 430 |             |                                   | 200 | 500          | 380 | 260 | 210 |
|                        | 0,02          | 75  | 400          | 315 | 240 | 190 |             | 0,12                              | 300 | 600          | 470 | 340 | 265 |
|                        |               | 100 | 450          | 355 | 270 | 220 |             |                                   | 400 | 675          | 540 | 390 | 315 |
|                        |               | 125 | 480          | 390 | 300 | 250 |             |                                   | 150 | 360          | 245 | 175 | 140 |
|                        |               | 150 | 510          | 415 | 325 | 295 |             |                                   | 200 | 430          | 300 | 210 | 165 |
|                        |               | 200 | 550          | 470 | 370 | 310 |             |                                   | 300 | 510          | 370 | 260 | 210 |
|                        |               | 300 | 595          | 530 | 435 | 370 |             |                                   | 400 | 570          | 430 | 300 | 240 |
|                        | 0,04          | 400 | 615          | 560 | 475 | 410 |             | 0,01                              | 25  | 390          | 310 | 225 | 180 |
|                        |               | 100 | 400          | 300 | 210 | 160 |             |                                   | 50  | 480          | 410 | 320 | 270 |
|                        |               | 125 | 450          | 340 | 240 | 190 |             |                                   | 75  | 515          | 460 | 380 | 315 |
|                        |               | 150 | 480          | 365 | 260 | 210 |             |                                   | 100 | 535          | 490 | 420 | 365 |
|                        |               | 200 | 540          | 420 | 310 | 250 |             |                                   | 125 | 540          | 510 | 450 | 400 |
|                        |               | 300 | 620          | 500 | 380 | 310 |             |                                   | 150 | 550          | 525 | 470 | 425 |
|                        | 0,06          | 400 | 670          | 555 | 440 | 360 |             |                                   | 200 | 555          | 535 | 500 | 460 |
|                        |               | 100 | 350          | 250 | 175 | 135 |             | 0,02                              | 400 | 560          | 555 | 540 | 520 |
|                        |               | 125 | 390          | 280 | 200 | 155 |             |                                   | 25  | 325          | 240 | 165 | 130 |
|                        |               | 150 | 430          | 320 | 220 | 175 |             |                                   | 50  | 440          | 345 | 250 | 200 |
|                        |               | 200 | 490          | 370 | 260 | 210 |             |                                   | 75  | 510          | 405 | 305 | 250 |
|                        |               | 300 | 580          | 450 | 325 | 260 |             |                                   | 100 | 550          | 450 | 350 | 290 |
|                        | 0,08          | 400 | 640          | 505 | 380 | 310 |             |                                   | 125 | 580          | 490 | 385 | 325 |
|                        |               | 125 | 340          | 240 | 165 | 125 |             | 0,04                              | 150 | 605          | 520 | 420 | 355 |
|                        |               | 150 | 370          | 260 | 185 | 150 |             |                                   | 200 | 630          | 560 | 470 | 400 |
|                        |               | 200 | 440          | 310 | 225 | 175 |             |                                   | 300 | 665          | 610 | 540 | 470 |
|                        |               | 300 | 530          | 400 | 280 | 215 |             |                                   | 400 | 675          | 640 | 570 | 515 |
|                        |               | 400 | 600          | 450 | 340 | 260 |             |                                   | 50  | 370          | 270 | 185 | 140 |
|                        | 0,12          | 200 | 360          | 250 | 180 | 140 |             | 0,04                              | 75  | 450          | 340 | 240 | 175 |
|                        |               | 300 | 420          | 305 | 215 | 175 |             |                                   | 100 | 510          | 400 | 280 | 220 |
|                        |               | 400 | 460          | 365 | 250 | 200 |             |                                   | 125 | 560          | 440 | 310 | 250 |
|                        |               |     |              |     |     |     |             |                                   |     |              |     |     |     |
| 40<br>{168}            | 0,08          | 150 | 540          | 405 | 280 | 225 | 40<br>{168} | 0,08                              | 150 | 540          | 405 | 280 | 225 |
|                        |               | 200 | 610          | 470 | 340 | 265 |             |                                   | 200 | 610          | 470 | 340 | 265 |
|                        |               | 300 | 715          | 570 | 430 | 345 |             |                                   | 300 | 715          | 570 | 430 | 345 |
|                        |               | 400 | —            | 640 | 490 | 400 |             |                                   | 400 | —            | 640 | 490 | 400 |
|                        | 0,12          | 100 | 375          | 265 | 170 | 135 |             | 0,12                              | 100 | 375          | 265 | 170 | 135 |
|                        |               | 125 | 420          | 290 | 195 | 155 |             |                                   | 125 | 420          | 290 | 195 | 155 |
|                        |               | 150 | 465          | 325 | 225 | 180 |             |                                   | 150 | 465          | 325 | 225 | 180 |
|                        |               | 200 | 545          | 390 | 265 | 210 |             |                                   | 200 | 545          | 390 | 265 | 210 |
|                        | 0,02          | 300 | 645          | 480 | 335 | 275 |             |                                   | 300 | 645          | 480 | 335 | 275 |
|                        |               | 400 | 705          | 545 | 390 | 315 |             |                                   | 400 | 705          | 545 | 390 | 315 |
|                        |               | 25  | 400          | 300 | 210 | 165 |             | 0,02                              | 25  | 400          | 300 | 210 | 165 |
|                        |               | 50  | 530          | 425 | 310 | 250 |             |                                   | 50  | 530          | 425 | 310 | 250 |
|                        |               | 75  | 595          | 495 | 380 | 315 |             |                                   | 75  | 595          | 495 | 380 | 315 |
|                        |               | 100 | 635          | 545 | 435 | 360 |             |                                   | 100 | 635          | 545 | 435 | 360 |
|                        | 0,04          | 125 | 665          | 580 | 480 | 400 |             |                                   | 125 | 665          | 580 | 480 | 400 |
|                        |               | 150 | 680          | 610 | 510 | 435 |             |                                   | 150 | 680          | 610 | 510 | 435 |
|                        |               | 200 | 700          | 645 | 560 | 490 |             |                                   | 200 | 700          | 645 | 560 | 490 |
|                        |               | 300 | 720          | 680 | 625 | 550 |             |                                   | 300 | 720          | 680 | 625 | 550 |
|                        |               | 400 | 725          | 700 | 650 | 600 |             |                                   | 400 | 725          | 700 | 650 | 600 |
|                        | 0,04          | 25  | 300          | 220 | 145 | 115 |             | 0,04                              | 25  | 300          | 220 | 145 | 115 |
|                        |               | 50  | 445          | 330 | 225 | 180 |             |                                   | 50  | 445          | 330 | 225 | 180 |
|                        |               | 75  | 525          | 400 | 290 | 235 |             |                                   | 75  | 525          | 400 | 290 | 235 |
|                        |               | 100 | 595          | 465 | 340 | 270 |             |                                   | 100 | 595          | 465 | 340 | 270 |
|                        |               | 125 | 645          | 510 | 380 | 310 |             |                                   | 125 | 645          | 510 | 380 | 310 |
|                        |               | 150 | 680          | 550 | 420 | 340 |             |                                   | 150 | 680          | 550 | 420 | 340 |
|                        | 0,08          | 200 | 730          | 615 | 475 | 395 |             |                                   | 200 | 730          | 615 | 475 | 395 |
|                        |               | 300 | 790          | 695 | 565 | 480 |             |                                   | 300 | 790          | 695 | 565 | 480 |
|                        |               | 400 | —            | 740 | 630 | 545 |             |                                   | 400 | —            | 740 | 630 | 545 |
|                        |               | 50  | 385          | 275 | 185 | 140 |             | 0,08                              | 50  | 385          | 275 | 185 | 140 |
|                        | 0,12          | 75  | 475          | 350 | 235 | 185 |             |                                   | 75  | 475          | 350 | 235 | 185 |
|                        |               | 100 | 540          | 405 | 280 | 225 |             |                                   | 100 | 540          | 405 | 280 | 225 |

Таблица 4.36. Максимальная температура, °С, достигаемая в элементе с коэффициентом массивности  $S/V$ ,  $\text{м}^{-1}$ , защищенном материалом с термическим сопротивлением  $e/\lambda$ ,  $\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{С}/\text{ккал}$ , в условиях реального пожара, определяемого эквивалентными коэффициентом проемности  $A \sqrt{H}/A_t$ ,  $\text{м}^{1/2}$ , и пожарной нагрузкой  $q$  ( $\text{Мкал}/\text{м}^2$  общей поверхности),  $\{\text{МДж}/\text{м}^2\}$  эквивалентной (см. разд. 2.4.1)

| q           | (A√h)/A <sub>t</sub> | S/V | e/λ  |     |     |     | q           | (A√h)/A <sub>t</sub> | S/V | e/λ  |     |     |     | q           | (A√h)/A <sub>t</sub> | S/V | e/λ  |     |     |     |
|-------------|----------------------|-----|------|-----|-----|-----|-------------|----------------------|-----|------|-----|-----|-----|-------------|----------------------|-----|------|-----|-----|-----|
|             |                      |     | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,3 |             |                      |     | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,3 |             |                      |     | 0,05 | 0,1 | 0,2 | 0,3 |
| 50<br>{210} | 0,02                 | 25  | 480  | 355 | 250 | 200 | 60<br>{250} | 0,02                 | 25  | 550  | 420 | 295 | 235 | 75<br>{315} | 0,04                 | 25  | 523  | 395 | 270 | 205 |
|             |                      | 50  | 605  | 490 | 375 | 300 |             |                      | 50  | 665  | 560 | 430 | 350 |             |                      | 50  | 665  | 540 | 400 | 320 |
|             |                      | 75  | 665  | 570 | 450 | 380 |             |                      | 75  | 715  | 640 | 515 | 435 |             |                      | 75  | 735  | 625 | 490 | 400 |
|             |                      | 100 | 700  | 620 | 510 | 435 |             |                      | 100 | 745  | 675 | 570 | 495 |             |                      | 100 | 790  | 680 | 550 | 455 |
|             |                      | 125 | 720  | 650 | 550 | 475 |             |                      | 125 | 760  | 705 | 610 | 540 |             |                      | 125 | —    | 710 | 600 | 505 |
|             |                      | 150 | 730  | 675 | 585 | 510 |             |                      | 150 | 770  | 725 | 640 | 575 |             |                      | 150 | —    | 750 | 640 | 550 |
|             |                      | 200 | 745  | 700 | 630 | 565 |             |                      | 200 | 780  | 750 | 690 | 625 |             |                      | 200 | —    | 809 | 695 | 605 |
|             |                      | 300 | 755  | 735 | 680 | 635 |             |                      |     |      |     |     |     |             |                      |     |      |     |     |     |
|             | 0,04                 | 25  | 350  | 255 | 170 | 135 |             | 0,04                 | 25  | 405  | 300 | 200 | 150 |             | 0,06                 | 25  | 400  | 280 | 185 | 140 |
|             |                      | 50  | 500  | 385 | 270 | 210 |             |                      | 50  | 560  | 430 | 305 | 240 |             |                      | 50  | 565  | 415 | 285 | 225 |
|             |                      | 75  | 600  | 460 | 340 | 265 |             |                      | 75  | 650  | 515 | 380 | 310 |             |                      | 75  | 670  | 510 | 365 | 290 |
|             |                      | 100 | 655  | 525 | 395 | 315 |             |                      | 100 | 715  | 580 | 440 | 360 |             |                      | 100 | 740  | 585 | 425 | 345 |
|             |                      | 125 | 705  | 575 | 435 | 355 |             |                      | 125 | 755  | 640 | 490 | 405 |             |                      | 125 | 790  | 640 | 480 | 390 |
|             |                      | 150 | 740  | 615 | 475 | 395 |             |                      | 150 | 790  | 675 | 530 | 440 |             |                      | 150 | —    | 685 | 525 | 430 |
|             |                      | 200 | 785  | 675 | 540 | 450 |             |                      | 200 | —    | 730 | 600 | 505 |             |                      | 200 | —    | 755 | 595 | 500 |
|             |                      | 300 | —    | 750 | 625 | 545 |             |                      | 300 | —    | 795 | 680 | 590 |             |                      | 300 | —    | —   | 695 | 600 |
|             | 400                  | —   | 795  | 690 | 600 |     |             |                      |     |      |     |     |     |             |                      |     |      |     |     |     |
|             | 0,06                 | 25  | 300  | 210 | 135 | 105 |             | 0,06                 | 25  | 345  | 240 | 155 | 120 |             | 0,08                 | 25  | 350  | 240 | 160 | 120 |
|             |                      | 50  | 445  | 320 | 215 | 170 |             |                      | 50  | 500  | 360 | 240 | 195 |             |                      | 50  | 510  | 365 | 250 | 190 |
|             |                      | 75  | 540  | 400 | 275 | 220 |             |                      | 75  | 600  | 450 | 315 | 250 |             |                      | 75  | 615  | 455 | 320 | 250 |
|             |                      | 100 | 610  | 465 | 330 | 260 |             |                      | 100 | 670  | 515 | 375 | 300 |             |                      | 100 | 700  | 530 | 375 | 300 |
|             |                      | 125 | 665  | 515 | 375 | 300 |             |                      | 125 | 725  | 570 | 415 | 340 |             |                      | 125 | 750  | 585 | 425 | 340 |
|             |                      | 150 | 710  | 560 | 410 | 330 |             |                      | 150 | 765  | 615 | 460 | 375 |             |                      | 150 | 800  | 640 | 470 | 385 |
|             |                      | 200 | 775  | 625 | 475 | 395 |             |                      | 200 | —    | 685 | 525 | 435 |             |                      | 200 | —    | 710 | 545 | 450 |
|             |                      | 300 | —    | 725 | 570 | 480 |             |                      | 300 | —    | 775 | 625 | 530 |             |                      | 300 | —    | —   | 650 | 550 |
|             | 400                  | —   | 790  | 635 | 545 | 400 |             | —                    | —   | 695  | 600 | 400 | —   |             | —                    | 730 | 625  |     |     |     |
|             |                      |     |      |     |     |     |             |                      |     |      |     |     |     |             |                      |     |      |     |     |     |
|             |                      |     |      |     |     |     |             | 25                   | 300 | 200  | 135 | 100 |     | 50          | 420                  | 290 | 190  | 150 |     |     |
|             |                      |     |      |     |     |     |             | 50                   | 450 | 315  | 210 | 160 |     | 75          | 525                  | 375 | 250  | 200 |     |     |
|             |                      |     |      |     |     |     |             | 75                   |     |      |     |     |     |             |                      |     |      |     |     |     |

|      |     |     |     |     |      |             |      |     |     |     |      |             |      |     |     |     |     |     |
|------|-----|-----|-----|-----|------|-------------|------|-----|-----|-----|------|-------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0,08 | 25  | 260 | 180 | 115 | 90   | 0,08        | 75   | 550 | 400 | 275 | 210  | 90<br>{380} | 0,12 | 100 | 600 | 440 | 300 | 240 |
|      | 50  | 400 | 275 | 180 | 140  |             | 100  | 615 | 400 | 325 | 255  |             |      | 125 | 680 | 500 | 350 | 275 |
|      | 75  | 500 | 350 | 240 | 190  |             | 125  | 680 | 515 | 365 | 290  |             |      | 150 | 725 | 550 | 390 | 300 |
|      | 100 | 555 | 410 | 290 | 225  |             | 150  | 725 | 560 | 400 | 330  |             |      | 200 | 800 | 620 | 450 | 360 |
|      | 125 | 615 | 460 | 325 | 255  |             | 200  | 800 | 640 | 475 | 390  |             |      | 300 | —   | 730 | 550 | 450 |
|      | 150 | 665 | 505 | 355 | 295  |             | 300  | —   | 750 | 580 | 480  |             |      | 400 | —   | 800 | 650 | 530 |
|      | 200 | 750 | 580 | 425 | 350  |             | 400  | —   | —   | 650 | 550  |             |      | 75  | 305 | 205 | 135 | 105 |
|      | 300 | —   | 680 | 525 | 430  |             | 0,12 | 50  | 370 | 250 | 160  |             |      | 125 | 100 | 365 | 250 | 165 |
| 400  | —   | 750 | 595 | 500 | 75   | 470         |      | 330 | 210 | 170 | 125  |             | 410  | 285 | 190 | 150 |     |     |
| 50   | 320 | 220 | 145 | 110 | 100  | 550         |      | 385 | 250 | 220 | 0,30 |             | 150  | 465 | 315 | 210 | 170 |     |
| 75   | 410 | 290 | 185 | 145 | 125  | 600         |      | 430 | 300 | 235 |      |             | 200  | 535 | 385 | 255 | 200 |     |
| 100  | 480 | 345 | 225 | 175 | 150  | 650         |      | 480 | 330 | 265 |      |             | 300  | 635 | 480 | 335 | 260 |     |
| 125  | 550 | 390 | 260 | 200 | 200  | 735         |      | 550 | 400 | 310 |      |             | 400  | 715 | 550 | 390 | 310 |     |
| 150  | 600 | 430 | 295 | 235 | 300  | —           |      | 660 | 500 | 400 |      |             | 0,04 | 25  | 630 | 480 | 330 | 260 |
| 200  | 675 | 500 | 350 | 280 | 400  | —           |      | 750 | 575 | 465 |      |             |      | 50  | 760 | 640 | 490 | 395 |
| 300  | 780 | 600 | 440 | 350 | 0,30 | 125         | 345  | 235 | 155 | 125 | 75   |             |      | —   | 725 | 590 | 490 |     |
| 400  | —   | 680 | 510 | 415 |      | 150         | 395  | 265 | 175 | 145 | 100  |             |      | —   | 770 | 650 | 560 |     |
| 125  | 305 | 205 | 135 | 110 |      | 200         | 460  | 325 | 215 | 165 | 125  |             | —    | 790 | 700 | 610 |     |     |
| 0,12 | 150 | 350 | 230 | 150 | 125  | 300         | 555  | 410 | 280 | 220 | 150  | —           | —    | 730 | 650 |     |     |     |
|      | 200 | 410 | 285 | 185 | 145  | 400         | 630  | 475 | 330 | 260 | 0,06 | 25          | 450  | 315 | 210 | 160 |     |     |
|      | 300 | 500 | 365 | 245 | 190  | 90<br>{380} |      |     |     |     |      | 50          | 625  | 470 | 325 | 255 |     |     |
|      | 400 | 575 | 425 | 290 | 225  |             |      |     |     |     |      | 75          | 730  | 570 | 410 | 330 |     |     |
|      |     |     |     |     |      |             |      |     |     |     |      | 100         | 795  | 640 | 475 | 390 |     |     |
|      |     |     |     |     | 125  |             |      |     |     |     |      | —           | 700  | 530 | 435 |     |     |     |
|      |     |     |     |     | 150  |             |      |     |     |     |      | —           | 745  | 575 | 480 |     |     |     |
|      |     |     |     |     | 200  |             |      |     |     |     |      | —           | —    | 650 | 550 |     |     |     |
|      |     |     |     |     | 300  |             |      |     |     |     |      | —           | —    | 750 | 665 |     |     |     |
|      |     |     |     |     | 0,08 |             |      |     |     |     |      | 25          | 400  | 275 | 180 | 140 |     |     |
|      |     |     |     |     |      | 50          | 570  | 415 | 285 | 220 |      |             |      |     |     |     |     |     |
|      |     |     |     |     |      | 75          | 680  | 510 | 360 | 285 |      |             |      |     |     |     |     |     |
|      |     |     |     |     |      | 100         | 755  | 590 | 420 | 340 |      |             |      |     |     |     |     |     |
|      |     |     |     |     |      | 125         | —    | 650 | 480 | 390 |      |             |      |     |     |     |     |     |
|      |     |     |     |     |      | 150         | —    | 700 | 520 | 430 |      |             |      |     |     |     |     |     |
|      |     |     |     |     |      | 200         | —    | 775 | 600 | 500 |      |             |      |     |     |     |     |     |
|      |     |     |     |     | 300  | —           | —    | 700 | 600 |     |      |             |      |     |     |     |     |     |

| $q$ | $(A\sqrt{h})/A_t$ | $S/V$ | $e/\lambda$ |     |     |     | $q$ | $(A\sqrt{h})/A_t$ | $S/V$ | $e/\lambda$ |     |     |     | $q$ | $(A\sqrt{h})/A_t$ | $S/V$ | $e/\lambda$ |     |     |     |  |  |
|-----|-------------------|-------|-------------|-----|-----|-----|-----|-------------------|-------|-------------|-----|-----|-----|-----|-------------------|-------|-------------|-----|-----|-----|--|--|
|     |                   |       | 0,05        | 0,1 | 0,2 | 0,3 |     |                   |       | 0,05        | 0,1 | 0,2 | 0,3 |     |                   |       | 0,05        | 0,1 | 0,2 | 0,3 |  |  |
|     |                   |       |             |     |     |     |     |                   |       |             |     |     |     |     | 0,12              | 25    | 320         | 220 | 140 | 105 |  |  |
|     |                   |       |             |     |     |     |     |                   |       |             |     |     |     |     |                   | 50    | 475         | 330 | 220 | 175 |  |  |
|     |                   |       |             |     |     |     |     |                   |       |             |     |     |     |     |                   | 75    | 590         | 425 | 285 | 225 |  |  |
|     |                   |       |             |     |     |     |     |                   |       |             |     |     |     |     |                   | 100   | 670         | 495 | 340 | 275 |  |  |
|     |                   |       |             |     |     |     |     |                   |       |             |     |     |     |     |                   | 125   | 740         | 550 | 395 | 305 |  |  |
|     |                   |       |             |     |     |     |     |                   |       |             |     |     |     |     |                   | 150   | 800         | 600 | 440 | 350 |  |  |
|     |                   |       |             |     |     |     |     |                   |       |             |     |     |     |     |                   | 200   | —           | 680 | 500 | 405 |  |  |
|     |                   |       |             |     |     |     |     |                   |       |             |     |     |     |     |                   | 300   | —           | 800 | 605 | 505 |  |  |
|     |                   |       |             |     |     |     |     |                   |       |             |     |     |     |     |                   | 400   | —           | —   | 700 | 595 |  |  |
|     |                   |       |             |     |     |     |     |                   |       |             |     |     |     |     | 0,30              | 75    | 355         | 245 | 160 | 125 |  |  |
|     |                   |       |             |     |     |     |     |                   |       |             |     |     |     |     |                   | 100   | 425         | 290 | 195 | 150 |  |  |
|     |                   |       |             |     |     |     |     |                   |       |             |     |     |     |     |                   | 125   | 480         | 335 | 225 | 175 |  |  |
|     |                   |       |             |     |     |     |     |                   |       |             |     |     |     |     |                   | 150   | 530         | 375 | 250 | 195 |  |  |
|     |                   |       |             |     |     |     |     |                   |       |             |     |     |     |     |                   | 200   | 610         | 445 | 300 | 235 |  |  |
|     |                   |       |             |     |     |     |     |                   |       |             |     |     |     |     |                   | 300   | 720         | 545 | 385 | 305 |  |  |
|     |                   |       |             |     |     |     |     |                   |       |             |     |     |     |     |                   | 400   | 800         | 625 | 455 | 360 |  |  |

Соотношение между временем  $t_1$ , необходимым для достижения определенной температуры в стальном элементе с коэффициентом массивности  $(S/V)_1$ , защищенном слоем какого-либо защитного материала толщиной  $e_1$ , и временем  $t_2$ , потребным для достижения той же температуры в стальном элементе с коэффициентом массивности  $(S/V)_2$ , защищенном слоем того же защитного материала толщиной  $e_2$ , определяется выражением [4.8]

$$\frac{t_1}{t_2} = \left\{ \frac{e_1}{e_2} \frac{(S/V)_2}{(S/V)_1} \right\}^{0,8}. \quad (4.9)$$

Эта формула действительна независимо от типа защитного материала (плитки, вспучивающаяся окраска и др.). Она обеспечивает запас только при фиксированном коэффициенте массивности, когда экстраполяция осуществляется в сторону меньших толщин защитного слоя и при фиксированной толщине, когда экстраполяция производится в сторону более высоких коэффициентов массивности.

При одновременной экстраполяции по массивности и толщине ошибка в определении времени может достигать 20 и даже 30%.

Помимо простоты главным достоинством этой формулы является то, что она облегчает классификацию по аналогии, как это предусмотрено указом от 19 января 1975 г. («Журналь Оффисьель» от 26 февраля 1977 г.).

Очевидно, что если изменения характеристик материала в зависимости от температуры известны, то более точные результаты даст применение формул, куда эти характеристики входят непосредственно, а не определение через коэффициент  $\gamma$ . В частности, уравнение Фурье в этом случае можно решать методом конечных разностей или методом конечных элементов.

**4.3.4. Водонаполненные конструкции.** Здесь речь пойдет о специальном методе, применяемом в случае использования в конструкциях металлических профилей замкнутого поперечного сечения.

Если в водонаполненной конструкции обеспечивается непрерывная циркуляция воды, то температура конструкций остается невысокой, поэтому она не подвергается никакой опасности. В более простых системах охлаждение обеспечивается исключительно испарением воды. Пар удаляется через вытяжку, а испарившаяся вода заменяется водой из резервуара или от пожарного гидранта. В этом случае расчет ведут на основе следующих соображений.

Тепловой поток  $\Phi$ , проникающий в замкнутый металлический профиль за время  $\Delta t$ , составляет

$$\Phi = K (\theta_f - \theta_s), \quad (4.10)$$

где  $\theta_s$  — температура обращенной к огню поверхности профиля.

В этом случае нельзя более полагать, что вся масса стали имеет одинаковую температуру, как это рассматривалось в разд. 4.3.3, ибо внутренняя поверхность профиля находится в контакте с жидкостью, температура которой ниже точки ее кипения, т. е. ниже  $100^\circ \text{C}$  при циркуляции воды в системе. Поэтому между наружной и внутренней по-

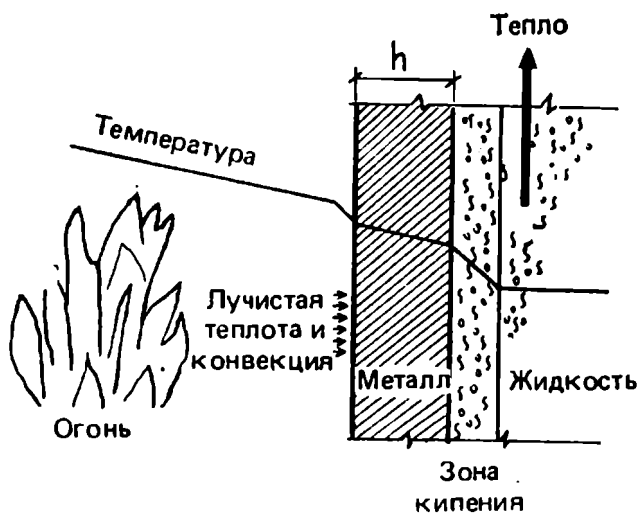


РИС. 4.17

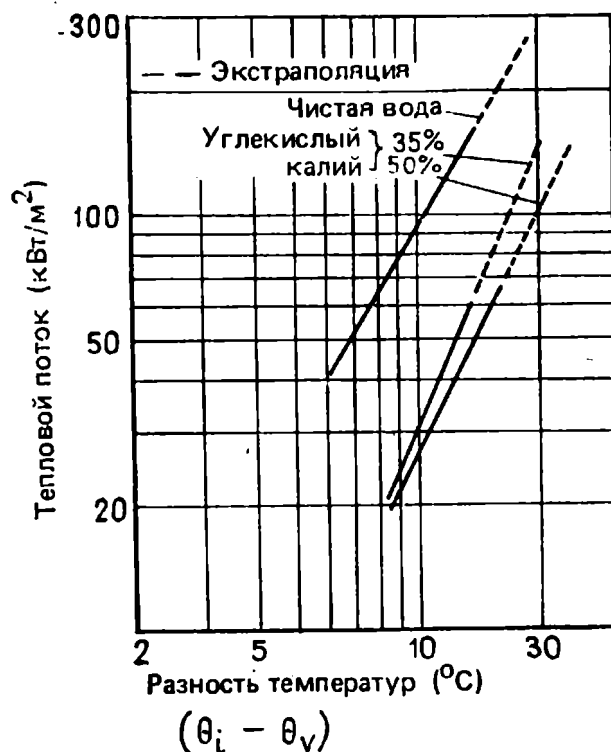


РИС. 4.18

верхностями профиля имеется температурный градиент, как показано на рис. 4.17.

Такой температурный градиент определяют из соотношения Фурье:

$$\Phi = (\lambda/h) (\theta_s - \theta_i), \quad (4.11)$$

где  $h$  — толщина стенки профиля;  $\theta_i$  — температура на внутренней поверхности металла, т.е. на поверхности контакта с жидкостью.

Приравнивая выражения  $\Phi$ , описываемые уравнениями (4.10) и (4.11), получим

$$K (\theta_f - \theta_s) = (\lambda/h) (\theta_s - \theta_i). \quad (4.12)$$

Кроме того, температурный градиент  $\theta_i - \theta_v$  (здесь  $\theta_v$  — температура кипения жидкости) зависит от гидростатического давления и теплового потока  $\Phi$ .

На основе проведенных экспериментальных исследований [4.9] предложена номограмма (рис. 4.18), которая позволяет непосредственно получить градиент  $\theta_i - \theta_v$  в зависимости от теплового потока  $\Phi$  для чистой воды и воды с раствором углекислого калия (поташа).

Система будет правильно функционировать, если жидкость способна отдавать тепло, которое она получит. Пренебрегая количеством тепла, которое поглощается металлом, следует принять, что весь определенный ранее поток  $\Phi$  должен быть поглощен повышением температуры и далее испарением жидкости.

Напомним в связи с этим, что 1 кг воды при нагревании на 1 °C поглощает 1 ккал (4,18 кДж) и что для обращения этой массы воды в пар потребуется 540 ккал (2275 кДж).

Поэтому система должна содержать массу  $M$  жидкости, которую определяют из соотношения

$$\int_0^t \Phi S dt \leq \frac{M}{C_p (\theta_v - \theta_0) + L_v}, \quad (4.13)$$

где  $C_p$  и  $L_v$  — соответственно удельная массовая теплоемкость и скрытая теплота парообразования жидкости;  $\theta_0$  — начальная температура жидкости.

**4.3.5. Системы автоматического пожаротушения.** Как указывалось в разд. 4.2.2.5, сеть автоматического пожаротушения может быть оригинальным и эффективным средством ограничения температуры конструкции (независимо от ее природы).

Минимальное количество используемой воды рассчитывают следующим образом.

Поток  $\Phi$ , достигающий элемент с обращенной к огню поверхностью  $S$ , составляет

$$\Phi = KS (\theta_f - \theta_s), \quad (4.14)$$

где  $K$  — полный коэффициент теплопередачи на смоченной поверхности элемента;  $\theta_s$  — температура на этой поверхности.

Предположим, что поток  $\Phi$  служит только для нагревания и испарения воды, стекающей по металлическому элементу. Тогда для фиксированного времени  $T$  будем иметь

$$\int_0^T \Phi dt = [C_p (100 - \theta_0) + L_v] M, \quad (4.15)$$

где  $L_v$  — скрытая теплота парообразования воды (540 ккал/кг),  $M$  — масса используемой воды;  $C_p$  — массовая удельная теплоемкость воды [1 ккал/(кг·°C)];  $\theta_0$  — начальная температура водопроводной сети, которую мы здесь считаем равной 20 °C.

Тогда выражение (4.15) можно записать в виде

$$\int_0^T \Phi dt = 620M. \quad (4.16)$$

Из этого выражения можно определить полную массу воды, которая должна стекать по элементу, а не ее расход, который теоретически должен возрастать с увеличением потока  $\Phi$ , т. е. с повышением температуры нагреваемой среды  $\theta_f$ . Поскольку это условие является трудно осуществимым с технологической точки зрения, можно вычислить  $M$ , предположив, что огонь сохраняет свою максимальную температуру  $\theta_{f \max}$  в течение всего времени  $T$ . Эта гипотеза приводит к завышению необходимого расхода воды в течение нескольких первых минут пожара. Реальный расход воды должен составлять

$$D = M/(TS) = [K (\theta_{f \max} - 20)]/620; \quad (4.17)$$

$$K = h_c + h_r. \quad (4.18)$$

Пусть  $h_c = 20$  ккал/(м²·ч·°C). Величина  $h_r$  зависит от излучательной способности смоченной поверхности, которую мы принимаем равной аналогичной характеристике воды, т. е. 0,97. При  $\varepsilon_f = 0,7$  мы по-

лучим  $\varepsilon_{res} = 0,68$ . Кроме того, зная, что  $C = 4,96 \cdot 10^{-8}$  ккал/(м<sup>2</sup>·ч × °С<sup>4</sup>), выражение для  $h_r$  можно записать в виде

$$h_2 = \frac{\varepsilon_{res} c (T_f^4 - T_s^4)}{\theta_f - \theta_s} = \frac{3,37 (T_f^4 - T_s^4)}{\theta_f - \theta_s} 10^{-8} \quad (4.19)$$

или при  $T_f = T_{f \max}$ ;  $\theta_s = 20$  °С и  $T_s = \theta_s + 273$

$$h_r \simeq 3,37 [(T_{f \max}^4 - 7,3 \cdot 10^9)/(\theta_{f \max} - 20)] 10^{-8}. \quad (4.20)$$

**Пр и м е р.** Допустим, что имеется колонна, выполненная из профиля НЕВ 220, высотой 3 м. Предположим, что эта колонна должна оказаться в условиях реального пожара, при котором максимальная температура окружающей среды будет достигнута через 15 мин и со-

ставит 1000° С. Тогда необходимый расход воды составит  $D = 1,58 K$  кг/(м<sup>2</sup>·ч), где  $K = 20 + 3,37 [(1273^4 - 7,3 \cdot 10^9)/980 \cdot 10^{-8}]$ ;  $K \simeq 110$  ккал/(м<sup>2</sup>·ч·°С). Отсюда расход составит  $D = 174$  л/(м<sup>2</sup>·ч).

Для орошения колонны расход должен достигать 663 л/ч.

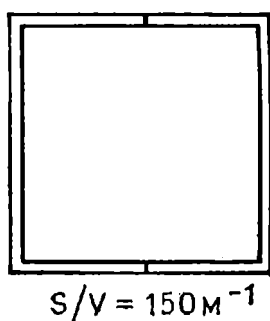
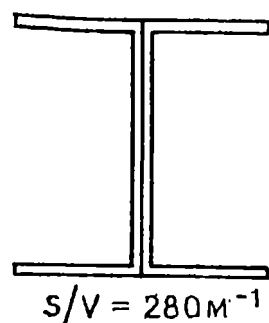


РИС. 4.19

#### 4.3.6. Практические замечания.

Описанное исследование помогает выявить основные особенности нагрева металлических элементов, которые следует учитывать в целях повышения их огнестойкости. Например, чрезвычайно важным фактором является массивность, которая позволяет иногда значительно ослабить защиту конструкции, а в некоторых случаях совсем от нее отказаться. Это замечание можно проиллюстрировать следующим примером. Допустим, что имеется элемент, состоящий из двух швеллеров УАР 100. Если эти швеллеры соединены полками наружу, то через четверть часа их температура может достигнуть 714°С, поскольку их массивность составляет 280 м<sup>-1</sup>. В противном случае, т. е. при соединении полками внутрь, температура металла не превысит 640°С, ибо массивность профиля составляет лишь 150 м<sup>-1</sup> (рис. 4.19).

Можно также изменять массивность, не меняя характера поперечного сечения, а используя лишь экраны, располагаемые на самом металлическом элементе, как было описано в разд. 4.2.2.3. Допустим, что имеется колонна, выполненная из двутавра НБА 140, к которому крепится ограждение. Если такой экран удален от колонны на несколько сантиметров, то через 15 мин его температура достигнет примерно 710°С ( $S/V = 252,9$  м<sup>-1</sup>), а если защитный экран прикреплен непосредственно к полке двутавра, то его температура составит лишь 685°С, поскольку его массивность уменьшилась до 200,8 м<sup>-1</sup>. Но даже такая небольшая разность температур может обеспечить несколько дополнительных минут, чтобы продлить огнестойкость конструкции. Разумеется, следует принять соответствующие меры по предотвращению чрезмерных деформаций ограждающей конструкции.

## 4.4. КРИТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

**4.4.1. Изменение механических свойств стали в зависимости от температуры.** Вследствие колебания атомов относительно их положения равновесия в любом твердом теле происходит постоянное молекулярное движение. Всякое повышение температуры вызывает повышение частоты и увеличение амплитуды этих колебаний. Это явление называется тепловым движением. Кроме того, нагрев вызывает диффузию атомов углерода, которая влечет за собой превращения кристаллической решетки. Так, при температуре порядка 700 °С сталь с малым содержанием легирующих добавок переходит из  $\alpha$ -ферритного состояния с объемно центрированной кубической решеткой в  $\gamma$ -аустенитное состояние с гранецентрированной решеткой [4.10]. При температуре около 1500 °С сталь представляет собой не что иное, как жидкий раствор углерода в железе.

Естественно, такие структурные превращения влекут за собой изменение механических свойств сталей. Так, в результате повышения температуры уменьшается сопротивление стали сдвигу, что обуславливает рост продольного удлинения и сильное развитие шейки при разрыве. Однако столь благоприятные явления компенсируются снижением предела текучести и временного сопротивления стали. Например, для мягкой строительной стали А 37 на рис. 4.20 приведены зависимости между напряжениями и деформациями при различных температурах [4.11].

Если предел текучести, соответствующий либо площадке пластического течения, либо остаточной деформации 0,2%, убывает достаточно равномерно, то временное сопротивление сначала несколько возрастает, достигая максимума при температуре 200—300 °С, а затем также убывает с ростом температуры. Естественно, что при температуре около 1500° С эти характеристики приближаются к нулю, поскольку в этом случае металл переходит в жидкое состояние. Однако до сих пор еще не проводились испытания на растяжение при температуре выше 900 °С, что объясняется, в частности, трудностями проведения экспериментов при высоких температурах. В большинстве испытаний на растяжение температура остается постоянной, а нагрузка возрастает с различной скоростью. Скорость приложения нагрузки играет важную роль, так как именно она обуславливает явление ползучести, т. е. прогрессирующей деформации металла при постоянной нагрузке. Более того, поскольку в разных лабораториях применяются различные методы испытаний, а состав и свойства сталей никогда не бывают строго одинаковыми, результаты этих испытаний отличаются значительным разбросом.

На рис. 4.21 и 4.22 представлены изменения предела текучести  $\sigma_e$  и временного  $\sigma_{max}$  сопротивления от температуры для мягких строительных сталей [4.4]. На обоих графиках выделена кривая, которая соответствует рекомендуемому изменению предела текучести [4.4] для расчетов на огнестойкость. Эта кривая описывается уравнением

$$\frac{\sigma(\theta)}{\sigma_e} = 1 + \frac{\theta}{900 \lg(\theta/1750)} \quad (4.21)$$

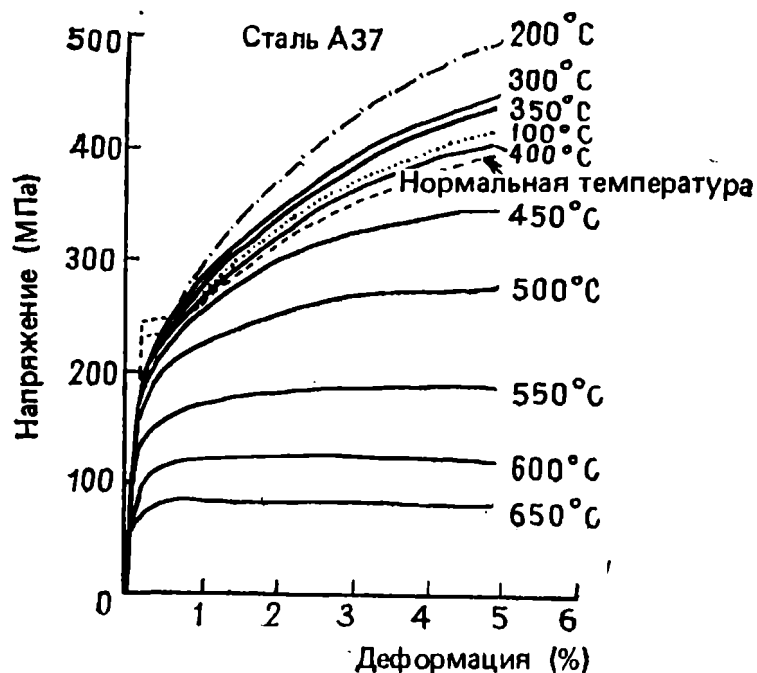


РИС. 4.20

РИС. 4.21. ЗАВИСИМОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

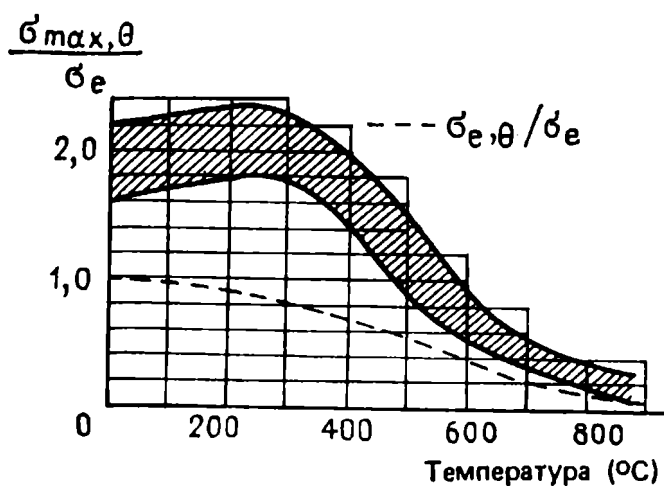
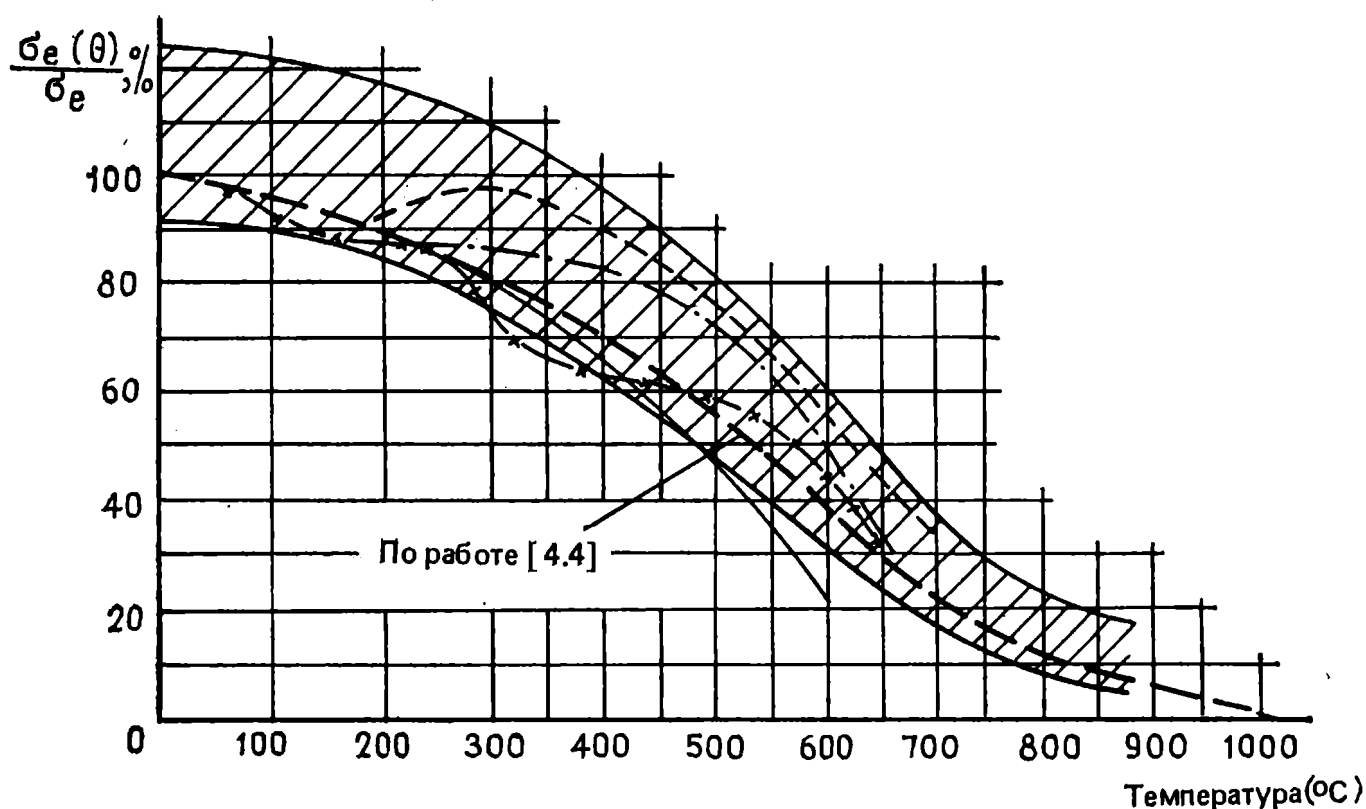


РИС. 4.22. ЗАВИСИМОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ВРЕМЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

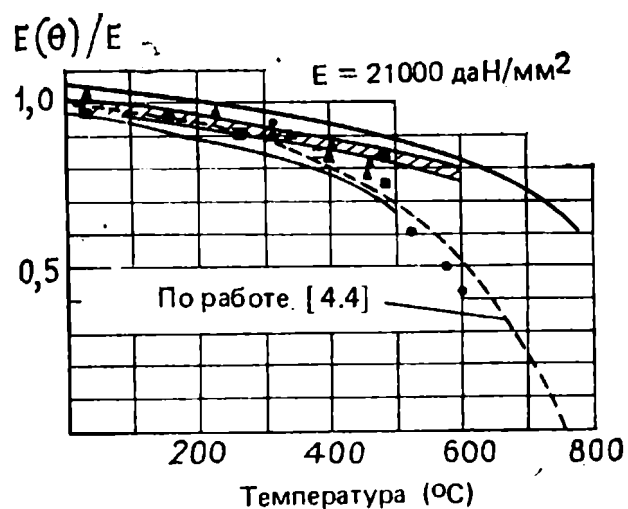


РИС. 4.23. ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ СТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ [4.4]

в области  $\theta \in [0, 600]$  и

$$\frac{\sigma_e(\theta)}{\sigma_e} = \frac{340 - 0,34\theta}{\theta - 240} \quad (4.22)$$

в области  $\theta \in [600, 1000]$ .

Аналогичным образом на рис. 4.23 приведены результаты экспериментальных исследований и рекомендуемая зависимость модуля упругости от температуры. Эта кривая описывается уравнением

$$\frac{E(\theta)}{E} = 1 + \frac{\theta}{2000 \lg(\theta/1100)} \quad (4.23)$$

#### 4.4.2. Основы расчета.

4.4.2.1. В условиях пожара несущая способность металлической конструкции по мере ее нагревания уменьшается, в то время как действующие на нее нагрузки остаются практически неизменными.

Достаточный нагрев конструкции может привести к такому распределению температур, при котором ее несущая способность будет лишь равна приложенным к ней нагрузкам. При этом условии произойдет разрушение конструкции. Это явление описывается соотношением

$$P_u(\theta) = P, \quad (4.24)$$

где  $P_u(\theta)$  — несущая способность, соответствующая полю температуры  $\theta$ ;  $P$  — нагрузка, приложенная к конструкции.

Из этого соотношения вытекает последовательность расчета на огнестойкость: расчет нагрева рассматриваемого металлического элемента (разд. 4.3); расчет несущей способности, определение температуры разрушения конструкции путем решения уравнения (4.24), сравнение температуры разрушения и температуры конструкции.

4.4.2.2. Согласно [4.4], нагрузка  $P$  представляет собой наиболее неблагоприятное сочетание из следующих сочетаний нагрузок:

$$\begin{aligned} &1,1G + 0,8Q_n; \\ &1,1G + Q_a; \\ &1,1G + \begin{Bmatrix} 0,7Q_n \\ 0,8Q_a \end{Bmatrix} + 1W + 1/2S; \\ &1,1G + \begin{Bmatrix} 0,7Q_n \\ 0,8Q_a \end{Bmatrix} + 1S, \end{aligned}$$

где  $G$  — постоянные нагрузки;  $Q_n$  — нагрузки, соответствующие нормальной эксплуатации;  $Q_a$  — нагрузки, соответствующие особым условиям эксплуатации, например  $500 \text{ кг/см}^2$  при тепловыделениях согласно ст. СО 71 норм безопасности (см. «Журнал Оффисель», вып. 1011);  $W$  — нормальная ветровая нагрузка;  $S$  — нормальная снеговая нагрузка.

Разумеется, в указанные сочетания нагрузок не входят экстремальные климатические условия, поскольку вероятность их появления одновременно с пожаром пренебрежимо мала.

4.4.2.3. Чтобы упростить расчет несущей способности  $P_u$ , можно ввести ряд упрощающих гипотез.

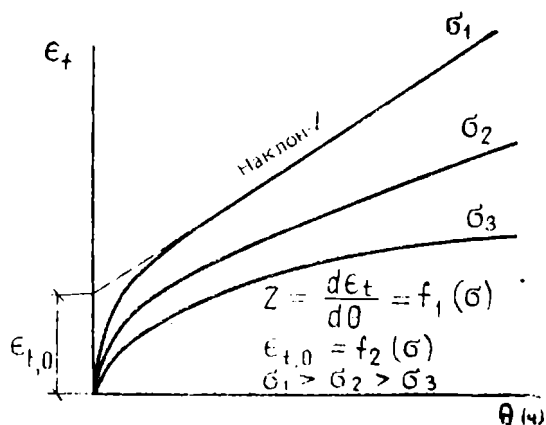


РИС. 4.24

Первая из них (см. разд. 4.3) заключается в том, что температура рассматриваемого элемента или рассматриваемой конструкции считается одинаковой в данный момент времени. Поэтому поле температур  $\theta$ , о котором мы говорили выше, сводится к единственному значению температуры. Однако для некоторых видов конструкций эта гипотеза является неприемлемой (см. разд. 4.6).

Вторая гипотеза заключается в пренебрежении эффектами ползучести, хотя они учитываются в любой теории. Их можно учитывать при решении простых задач с использованием модели Дорна [4.12], которая предполагает, что деформация ползучести зависит только от напряжения  $\sigma$  и от переменной температура—время  $\Omega$ , определяемой выражением

$$\Omega = \int_0^t \exp(-\Delta H/RT) dt, \quad (4.25)$$

где  $\Delta H$  — энергия активации, необходимая для ползучести, кал/моль;  $R$  — идеальная газовая постоянная, кал/(моль · К);  $T$  — абсолютная температура, К;  $t$  — время, ч.

Характер кривых  $\epsilon_t$  —  $\Omega$  показан на рис. 4.24. Они имеют линейный участок (вторичный период ползучести), наклон которого  $d\epsilon_t/d\Omega$  обозначен  $Z$  (параметр Зенера—Холломона [4.13]). При этом предполагается, что наклон  $Z$ , как и начальная ордината  $\epsilon_{t,0}$ , зависит только от напряжения  $\sigma$ :

$$Z = \frac{d\epsilon_t}{d\Omega} = f_1(\sigma); \quad (4.26)$$

$$\epsilon_{t,0} = f_2(\sigma). \quad (4.27)$$

С другой стороны, параметры  $\epsilon_{t,0}$ ,  $\Omega$ ,  $Z$  и  $\epsilon_{t,0}$  связаны между собой соотношением

$$\epsilon_t = \frac{\epsilon_{t,0}}{\log 2} \operatorname{Arg} \operatorname{ch} 2 \frac{Z\Omega}{\epsilon_{t,0}}. \quad (4.28)$$

С помощью соотношения (4.28) деформацию ползучести  $\epsilon_t$  можно вычислить для любого значения  $\Omega$ , если известно соотношение  $\Delta H/R$ , зависящее от типа стали и от законов изменения  $Z$  и  $\epsilon_{t,0}$  в функции  $\sigma$ . Эти данные можно получить на основе классических испытаний на ползучесть.

Указанная модель ползучести подробно разработана в [4.12] и [4.14].

Однако можно отметить, что учитывать деформацию ползучести весьма трудно. Кроме того, сопоставление с экспериментами метода расчета, в котором она не учитывается [4.15], показало, что в большинст-

ве случаев ее влияние невелико. Поэтому при всех дальнейших расчетах ползучесть нами не рассматривается.

В этих условиях  $P_u(\theta)$  можно определить либо на основе классической теории упругости, либо на основе метода расчета стержневых систем с учетом пластических деформаций [4.16]. Первый метод является более осторожным, поскольку в этом случае разрушение конструкции соответствует первому появлению пластических деформаций ( $\sigma = \sigma_e$ ) в каком-либо волокне. Во втором случае разрушение конструкции соответствует достижению предела текучести во всех точках достаточного числа сечений, называемых пластическими шарнирами, при котором конструкция превращается в механизм. Отметим, наконец, что только расчет с учетом пластических деформаций позволяет корректно сопоставить теоретические и экспериментальные данные.

К сожалению, этот метод расчета еще не получил достаточного распространения, а непосвященный читатель может найти некоторые сведения по этому вопросу в [4.17]. По тем же причинам рассмотрим ниже несколько элементарных случаев расчета, которые нетрудно распространить на более сложные конструкции.

#### 4.4.3. Простейшие конструкции.

**4.4.3.1. Растянутые элементы.** Пусть к стержню с поперечным сечением  $A$  приложено растягивающее усилие  $N$ , соответствующее наиболее неблагоприятному сочетанию нагрузок, определенному в разд. 4.4.2.2.

Тогда предельная нагрузка, которую может воспринять стержень, составляет

$$N_p = A\sigma_e. \quad (4.29)$$

При температуре  $\theta$  соотношение (4.29) принимает вид

$$N_p(\theta) = A\sigma_e(\theta). \quad (4.30)$$

Разрушение произойдет при температуре  $\theta_r$ , т. е. при так называемой критической температуре, при которой

$$N_p(\theta_r) = N \quad (4.31)$$

или

$$A\sigma_e(\theta_r) = A\sigma.$$

Пусть

$$\sigma_e(\theta_r) = \sigma. \quad (4.32)$$

Тогда можно записать

$$\sigma_e(\theta_r)/\sigma_e = \sigma/\sigma_e = N/N_p. \quad (4.33)$$

Теперь можно определить  $\theta_r$  с помощью рекомендуемой кривой (рис. 4.21) или из уравнений (4.21) и (4.22), на основе которых можно записать

$$\theta_r = 745 [1 - (N/N_p)^{1,3}]^{2/3} \quad (4.34)$$

при

$$0,38 < (N/N_p) \leq 1$$

и

$$\theta_r = \frac{r(240N/N_p) + 340}{(N/N_p) + 0,34} \quad (4.35)$$

при

$$(N/N_p) \leq 0,38.$$

Формула (4.35) является точной, а формула (4.34) — приближенной, поэтому иногда она может давать неблагоприятные результаты.

**4.4.3.2. Колонны.** Рассмотрим колонну, нагруженную осевой силой  $N$ . Расчет ее разрушающей нагрузки аналогичен приведенному выше но в данном случае вводится коэффициент продольного изгиба, который можно определить по формуле, рекомендованной Европейской конвенцией по металлическим конструкциям:

$$k = 0,5 + 0,554\bar{\lambda}^2 + \sqrt{(0,5 + 0,554\bar{\lambda}^2)^2 - 0,738\bar{\lambda}^2}, \quad (4.36)$$

где

$$\bar{\lambda} = \lambda/\pi \sqrt{\sigma_e/E} \quad (4.37)$$

и

$$\lambda = l/r. \quad (4.38)$$

Поскольку  $\sigma_e$  и  $E$  имеют сходные законы изменения в зависимости от температуры (в относительном выражении), предполагается, что величина  $\bar{\lambda}$  не зависит от температуры. Тогда от температуры не зависит и коэффициент  $k$ .

Следовательно, разрушающая нагрузка колонны составляет

$$N_p(\theta_r) = [A\sigma_e(\theta_r)]/k, \quad (4.39)$$

а температуру ее разрушения можно определить по рис. 4.22 или из уравнений (4.21) и (4.22) и выражения

$$\frac{\sigma_e(\theta_r)}{\sigma_e} = \frac{k\sigma}{\sigma_e} = \frac{N}{N_p}. \quad (4.40)$$

**4.4.3.3. Статически определимые балки.** Наибольший изгибающий момент в свободно опертой балке при действии равномерно распределенной нагрузки имеет место в середине пролета и составляет

$$M = pl^2/8, \quad (4.41)$$

а наибольшее напряжение от изгиба равно:

$$\sigma = M/S_e, \quad (4.42)$$

где  $S_e = I/v$  — момент сопротивления сечения, полностью находящегося в упругой стадии работы.

На основании теории расчета с учетом пластических деформаций для разрушения балки достаточно, чтобы в наиболее нагруженном сечении образовался пластический шарнир. Такой шарнир образуется при нагрузке

$$p_u = 8M_p/l^2, \quad (4.43)$$

где  $M_p$  — пластический момент в сечении, в котором образуется шарнир.

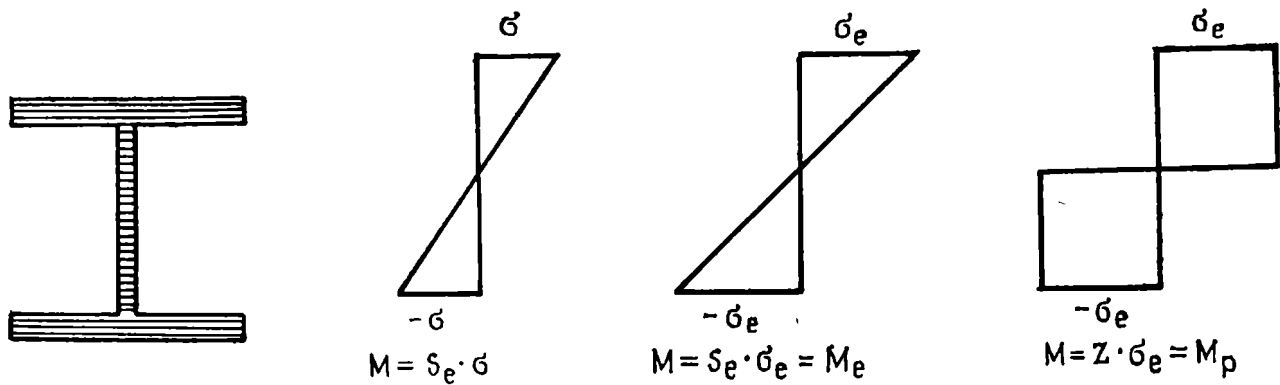


РИС. 4.25

Он определяется по формуле

$$M_p = Z\sigma_e, \quad (4.44)$$

где  $Z$  — пластический момент сопротивления, равный для симметричных профилей удвоенному статическому моменту полусечения.

Распределение напряжений при различных значениях приложенного изгибающего момента приведено на рис. 4.25.

Как и напряжение  $\sigma_e$  момент  $M_p$  изменяется в зависимости от температуры:

$$M_p(\theta) = Z\sigma_e(\theta), \quad (4.45)$$

тогда разрушающая нагрузка балки составит

$$p_u(\theta) = 8M_p(\theta)/l^2. \quad (4.46)$$

По формуле (4.24) можно определить температуру, при которой произойдет разрушение:

$$8Z\sigma_e(\theta)/l^2 = 8S_e\sigma/l^2. \quad (4.47)$$

Вводя  $f = Z/S_e$  — коэффициент формулы сечения, приведем формулу (4.47) к виду

$$\sigma_e(\theta_r) = \sigma/f, \quad (4.48)$$

или

$$\sigma_e(\theta_r)/\sigma_e = \sigma/(f\sigma_e) = p/p_u. \quad (4.49)$$

Тогда определение температуры разрушения следует производить так же, как и в разд. 4.4.3.1 и 4.4.3.2, с заменой лишь  $N/N_p$  на  $p/p_u$ .

**4.4.3.4. Статически неопределимые балки.** В качестве примера рассмотрим балку на трех опорах, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой, хотя используемый метод пригоден для любой неразрезной балки.

Наибольшее напряжение на средней опоре при  $P = pl$  составляет

$$\sigma = Pl/8S_e, \quad (4.50)$$

откуда

$$P = 8S_e\sigma/l. \quad (4.51)$$

Разрушение происходит после образования трех пластических шарниров (рис. 4.26) при нагрузке

$$P_u = 12M_p/l. \quad (4.52)$$

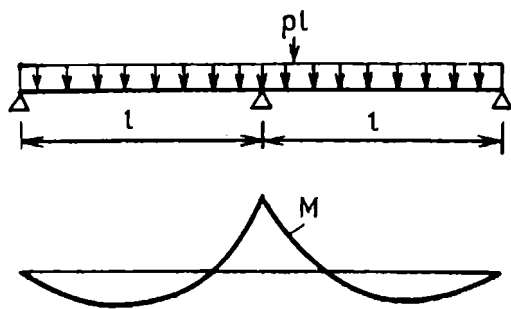


РИС. 4.27

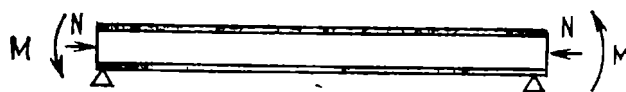
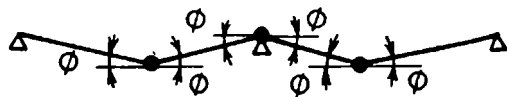


РИС. 4.28



•: Пластический шарнир

Согласно теореме о виртуальных работах, работа пластического момента в трех шарнирах при бесконечно малом повороте  $\Phi$  равна работе внешних сил

$$3 (M_p \cdot 2\Phi) = 4 \left( P_u \frac{1}{2} \frac{l}{4} \Phi \right), \quad (4.53)$$

откуда следует соотношение (4.52).

Температура, при которой происходит разрушение, можно определить из условия

$$P_u(\theta_r) = 12Z\sigma_e(\theta_r)/l = 8S_e\sigma/l \quad (4.54)$$

или

$$\sigma_e(\theta_r) = \sigma/(f\chi), \quad (4.55)$$

где  $\chi = 12/8$  — коэффициент статической неопределимости, характеризующий запас прочности балки после образования первого пластического шарнира.

Разумеется, в случае статически определимой конструкции (см. разд. 4.4.3.3)  $\chi = 1$ , в связи с чем соотношение (4.55) можно переписать в виде

$$\sigma_e(\theta_r)/\sigma_e = \sigma/(f\chi\sigma_e) = P/P_u. \quad (4.56)$$

Теперь из рис. 4.22 или из уравнений (4.34) и (4.35) можно определить температуру разрушения  $\theta_r$ .

**4.4.3.5. Сжато-изогнутые элементы.** В этом случае невозможно отделить действие изгиба от действия осевого (сжимающего или растягивающего) усилия. Следует рассматривать два возможных случая.

1. Основным является изгиб. Осевая сила (обычно сжимающая) снижает величину предельного изгибающего момента, как это видно из соотношений

$$M_u(\theta) = M_p(\theta) \quad (4.57)$$

при

$$0 \leq N/N_p(\theta) \leq p$$

и

$$M_u(\theta) = t \left( 1 - \frac{N}{N_p(\theta)} \right) M_p(\theta). \quad (4.58)$$

при

$$\rho < N/N_p(\theta) \leq 1.$$

Коэффициенты  $\rho$  и  $t$ , входящие в выражения (4.57) и (4.58), для профилей JPE составляют соответственно 0,18 и 1,22, а для профилей HE — 0,1 и 1,11.

Например, для элемента, представленного на рис. 4.27, температуру разрушения можно определить из выражения

$$M_u(\theta_r) = M \quad (4.59)$$

или

$$M = t \left( 1 - \frac{N}{N_p(\theta)} \right) M_p(\theta_r). \quad (4.60)$$

Зная, что

$$N_p(\theta_r) = A\sigma_e(\theta_r)$$

и

$$M_p(\theta_r) = Z\sigma_e(\theta_r),$$

можно привести выражение (4.60) к виду

$$M = tZ\sigma_e(\theta_r) - (NtZ)/A, \quad (4.61)$$

а выражение (4.61) — к виду

$$\sigma_e(\theta_r)/\sigma_e = \sigma_f/(t f \sigma_e) + \sigma_n/\sigma_e = M/(tM_p) + N/N_p, \quad (4.62)$$

где  $\sigma_f = M/S_e$  — напряжение от изгиба;  $\sigma_n = N/A$  — сжимающее напряжение.

Разумеется, при этом следует убедиться, что полученная из выражения (4.62) температура разрушения такова, что остается действительным закон взаимодействия  $M - N$ , выражаемый формулой (4.60), т. е.  $N/[N_p(\theta_r)] > \rho$ .

2. Основным является сжатие. В этом случае разрушение происходит вследствие потери устойчивости, а изгиб лишь способствует усилению этого явления.

Температуру разрушения можно определить из выражения

$$\sigma_e(\theta_r)/\sigma_e = k_0 N/N_p + k_f M/M_p \quad (4.63)$$

или из выражения

$$\sigma_e(\theta_r)/\sigma_e = k_0 \sigma_n/\sigma_e + k_f \sigma_f/(f \sigma_e). \quad (4.64)$$

Величины  $k_0$  и  $k_f$  следует определять на основе расчета с учетом пластических деформаций. Более подробные сведения по этому вопросу читатель найдет в [4.16]. Коэффициент  $k_f$  проще определять для упругой стадии, что позволяет избежать процедуры последовательных приближений, свойственных пластическому расчету.

**4.4.4. Сложные конструкции.** В более сложных конструкциях использование методов учета пластических деформаций требует применения ЭВМ. Пусть имеется рама (рис. 4.28), где  $P_1$  означает только собственный вес мостового крана, а не нагрузку, которую он может воспринять, поскольку логично предположить, что при пожаре подъемно-транспортное оборудование производственного значения будет остановлено.

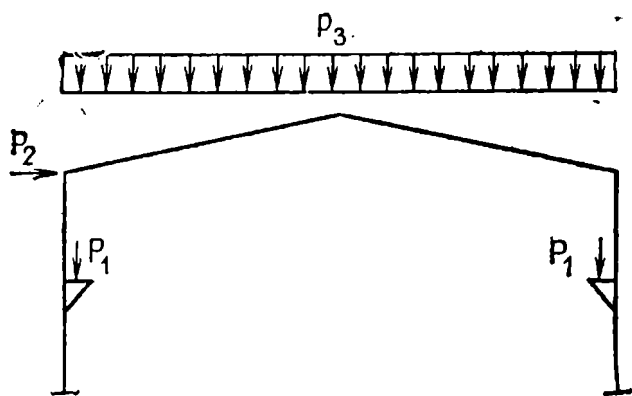


РИС. 4.28

Предположим, что нагрузки, подлежащие учету в соответствии с указаниями разд. 4.4.2.2, образуют сочетание  $P = aP_1 + bP_2 + cP_3$ .

Программой пластического расчета [4.18] предусматривается определение повышающего коэффициента  $\lambda$  к нагрузке  $P$ , т. е. разрушение происходит при нагрузке  $\lambda P$ . Следовательно:

$$P/P_u = 1/\lambda = \sigma_e(\theta_r)/\sigma_e. \quad (4.65)$$

Соотношение (4.65) позволяет найти температуру разрушения  $\theta_r$  с помощью рис. 4.2 или уравнений (4.34) и (4.35).

**Примечание.** Независимо от вида рассматриваемого элемента, прежде чем приступать к определению  $\theta_r$ , следует убедиться, что разрушение не может произойти вследствие явлений потери местной устойчивости или потери устойчивости при изгибе с кручением.

**4.4.5. Элементы с частичным стеснением температурных деформаций.** Примеры, приведенные в разд. 4.4.3 и 4.4.4, относятся лишь к элементам, температурные деформации которых не подвержены никаким ограничениям. В действительности, ввиду наличия в здании системы внутренних помещений огонь часто оказывается локализованным (по крайней мере, в начале пожара) и поэтому воздействует лишь на весьма ограниченное число несущих элементов конструкции. При этом может происходить стеснение температурных деформаций, которое оказывает остальная конструкция на нагретые от пожара элементы.

Рассмотрим в качестве примера колонну  $ab$  (рис. 4.29), работа которой схематически представлена на рис. 4.30. Видно, что вместо свободного удлинения колонны  $\alpha\theta l$  имеет место меньшее удлинение  $\epsilon_\theta l$ . В связи с этим в колонне возникает напряжение вследствие стесненного удлинения  $\epsilon_k l = (\alpha\theta - \epsilon_\theta) l$ , а в примыкающей конструкции — напряжение от  $\epsilon_\theta l$ .

Напряжение в колонне составляет

$$\sigma_\theta = \epsilon_k E(\theta). \quad (4.66)$$

Изменения модуля Юнга при действии температуры можно определить из рис. 4.24.

Напряжение  $\sigma_\theta$  соответствует усилию

$$F = \epsilon_k AE(\theta). \quad (4.67)$$

При дальнейшем расчете потребуется определить жесткость конструкции при условии отсутствия стержня  $ab$ . Для этого вместо стержня  $ab$  к соответствующему узлу приложим силу  $F_1$  (рис. 4.31).

Перемещение  $\delta$  под действием силы  $F_1$  определяет коэффициент жесткости  $\zeta$ :

$$\zeta = F_1/\delta. \quad (4.68)$$

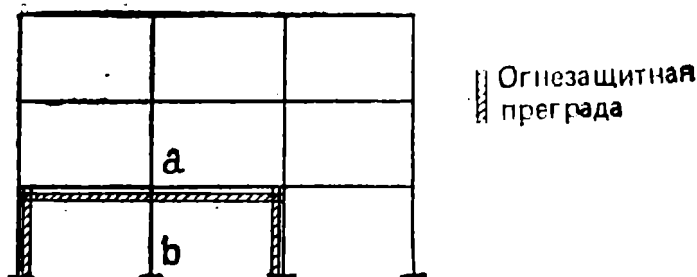
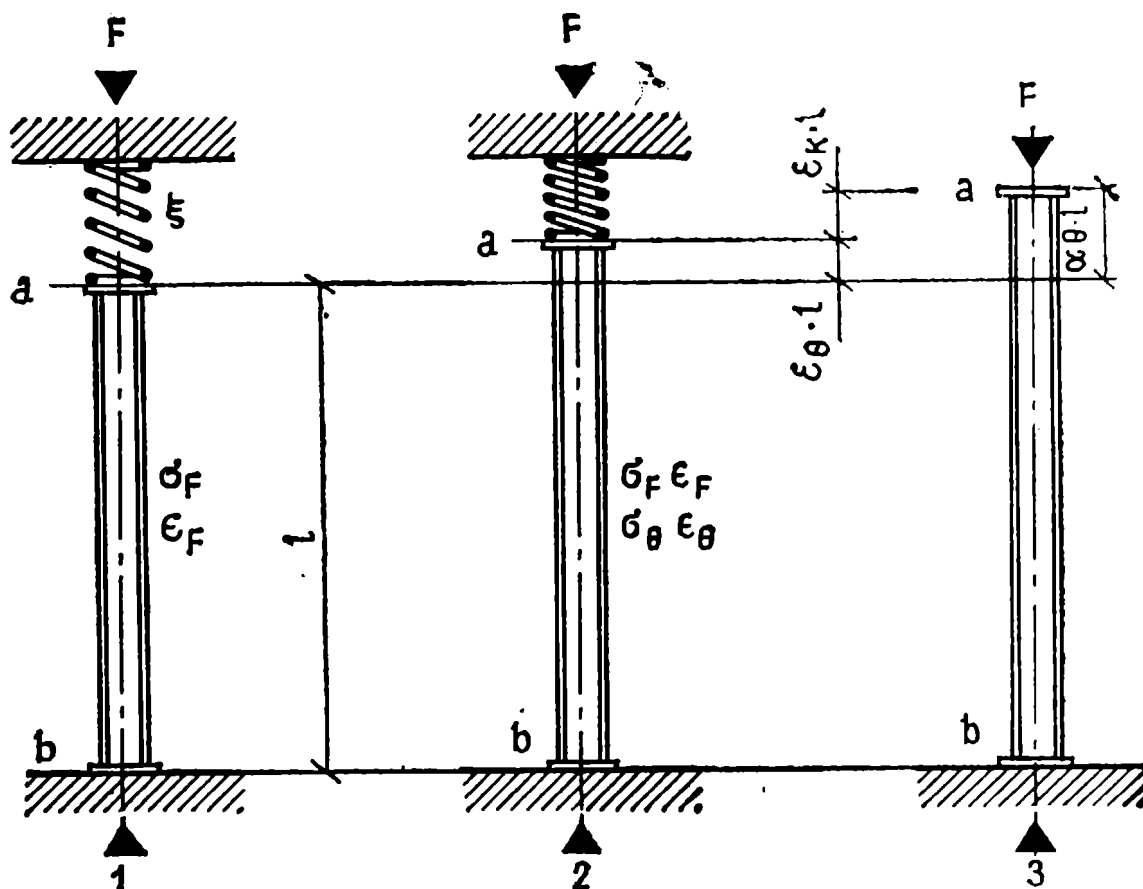


РИС. 4.30

1 — начальное состояние; 2 — частично стесненная температурная деформация; 3 — свободная температурная деформация



Поскольку свободная, т. е. ничем не стесненная, температурная деформация стержня  $ab$  равна  $\epsilon_\theta l$ , формула (4.68) показывает, что усилие, возникающее в конструкции под действием этой деформации, составляет

$$F' = \xi \epsilon_\theta l. \quad (4.69)$$

Разумеется,  $F = F'$ , в связи с чем получаем соотношение

$$\epsilon_K E(\theta) A = \xi \epsilon_\theta l, \quad (4.70)$$

которое можно также записать в виде

$$(\alpha\theta - \epsilon_\theta) E(\theta) = R \epsilon_\theta, \quad (4.71)$$

приняв

$$R = \xi l / A.$$

Определяя  $\epsilon_\theta$  из выражения (4.71) и подставляя ее в формулу (4.69), получим напряжение в колонне от частичного стеснения температурного расширения:

$$\sigma_\theta = \frac{E(\theta) \alpha\theta}{1 + [E(\theta)/R]}. \quad (4.72)$$

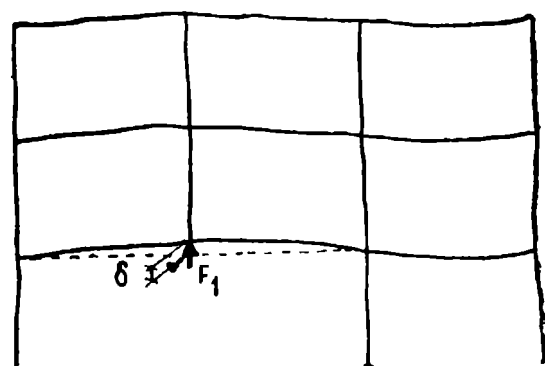


РИС. 4.31

Выражение (4.72) позволяет определить для очень жесткой конструкции ( $R \rightarrow \infty$ ) температурную деформацию «блокированной» колонны ( $\varepsilon_\theta = 0$ ) и свободную температурную деформацию ( $\varepsilon_\theta = \alpha_\theta$ ) при нулевой жесткости ( $P = 0$ ).

Определив, таким образом, напряжение  $\sigma_\theta$ , можно показать, что потеря несущей способности колонны при действии осевой нагрузки  $N$  происходит, когда выполняется условие

$$\sigma_e(\theta_r) = k(\sigma + \sigma_\theta), \quad (4.73)$$

где

$$\sigma = N/A.$$

Здесь  $K$  — коэффициент продольного изгиба колонны.

Выражение (4.73) можно также привести к виду

$$\frac{\sigma}{\sigma_e} = \frac{\sigma_e(\theta_r)}{k\sigma_e} - \frac{\alpha\theta E(\theta_r)}{\sigma_e[1 + E(\theta_r)/R]}. \quad (4.74)$$

Поскольку это уравнение не является явным, значение критической температуры при данном напряжении  $\sigma$ , данном коэффициенте жесткости  $R/E$  и данном коэффициенте  $k$  продольного изгиба можно найти лишь методом последовательных приближений. Чтобы избежать столь затруднительной процедуры, в прил. 4 к настоящей главе читатель найдет номограммы для определения критической температуры в зависимости от  $k\sigma/\sigma_e$ ,  $R/E$  и гибкости.

Эти номограммы построены для диапазона температур от 0 до 750° С, поскольку изменение напряжения  $\sigma_e$  от температуры определяется формулой (4.21). Дальнейшее расширение этого диапазона не представлялось возможным в связи с тем, что изменение модуля Юнга при высокой температуре еще плохо изучено. Это приводит к необходимости использовать формулу (4.23) и не позволяет учитывать изменения  $\sigma_e$  по формуле (4.22).

Далеко не всегда известно, нужно ли учитывать стеснение температурной деформации. Можно предположить [4.4], что элемент может свободно деформироваться при воздействии температуры, если  $R/E \leq$

$\leq 0,01$ . Этому случаю отвечают обычные трех- или четырехэтажные здания.

В сомнительных случаях нельзя избежать априорного определения величины  $R/E$  [для того, чтобы точно представлять себе, насколько значительным является стеснение температурной деформации. Поскольку такой расчет достаточно длителен и сложен, его можно заменить более простым, но менее точным приближенным расчетом, при котором рассматриваемая

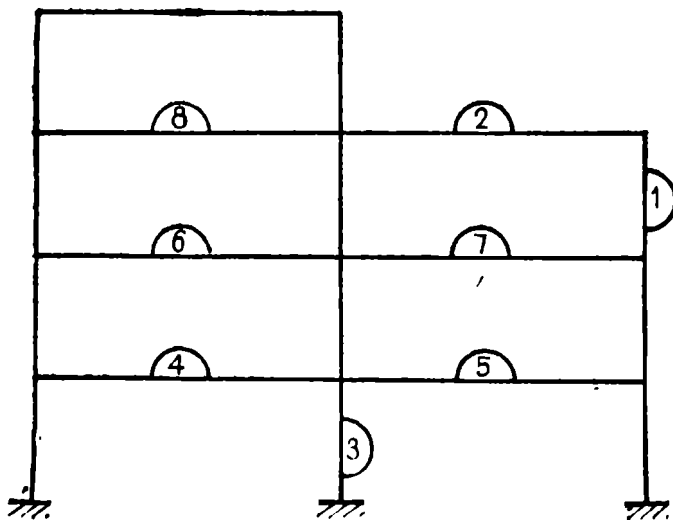


РИС. 4.32

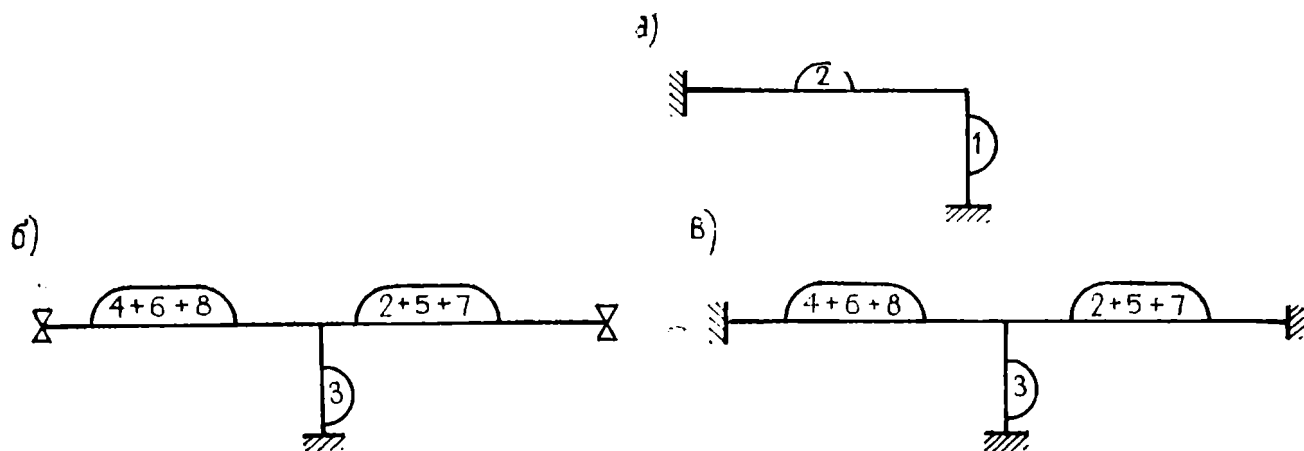


РИС. 4.33

конструкция разделяется на элементарные конструкции. Например, для колонны 1 конструкции, представленной на рис. 4.32, можно принять упрощение, приведенное на рис. 4.33.

Аналогичным образом, для колонны 3 (рис. 4.32) значение  $R/E$  заключено между величинами, указанными на рис. 4.33, б, в.

Для таких элементарных расчетов используют метод, описываемый уравнениями (4.68) — (4.71). Этот расчет будет точен лишь для конструкций, симметричных относительно колонны. В других случаях приходится пренебрегать стеснением поворота верхнего конца колонн; в результате чего получается заниженное значение коэффициента  $R/E$ .

Приближенный метод может приводить к относительным ошибкам, составляющим 300%. Поэтому он обеспечивает лишь качественный подход, позволяющий выделить случаи стеснения температурных деформаций, в которых становится необходимым более точное определение коэффициента  $R/E$ .

**4.4.6. Предельные значения критических температур.** В отсутствие какого бы то ни было расчета предполагается, что для элементов со свободной температурной деформацией ( $R/E \leq 0,01$ ) нижний предел критической температуры составляет  $440^\circ \text{C}$  для статически определимых элементов и  $500^\circ \text{C}$  для статически неопределимых элементов, когда их рассчитывают по упругой стадии работы [4.4]. В действительности иногда встречаются критические температуры, меньшие указанных значений, поэтому во всех возможных случаях желательно выполнять самый строгий расчет.

Температура разрушения элементов с частичным стеснением температурной деформации не может быть ниже  $250^\circ \text{C}$  [4.4].

**4.4.7. Соединения.** Соединения (сварные, на высокопрочных болтах и пр.) рассчитывают с помощью эмпирических методов, поэтому трудно оценить их огнестойкость. В связи с этим принимается, что при расчете соединений в «холодном» состоянии обычным путем (если они защищаются от огня так же, как и вся остальная конструкция) их прочность при воздействии повышенных температур не меньше прочности остальной конструкции [4.4]. Более того, соединения позволяют увеличить прочность конструкции. Например, при соединении на накладках (рис. 4.34) можно сместить положение пластического шарнира вследствие более высокой прочности и большей массивности зоны соединения, что задерживает ее нагрев.

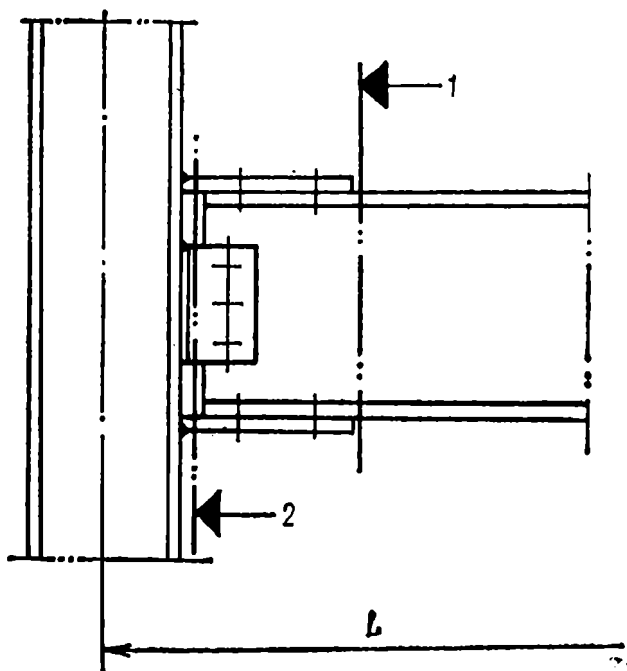


РИС. 4.34. ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЕ ПОЛОЖЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ШАРНИРА, УЧИТЫВАЕМОЕ В РАСЧЕТЕ (1) И ЕГО ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ (2)

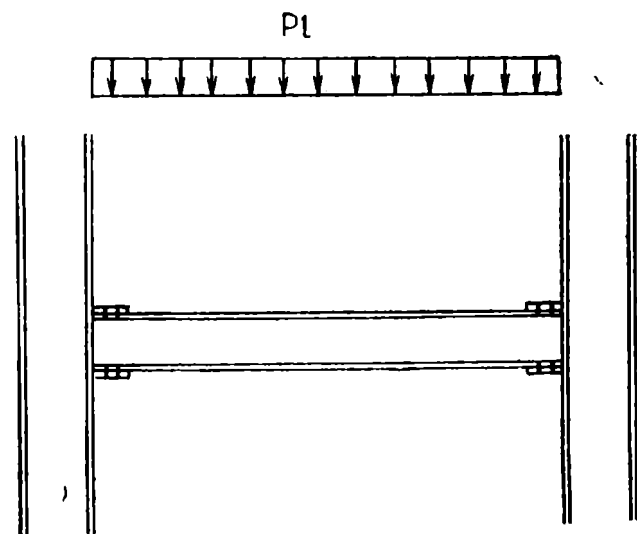


РИС. 4.35

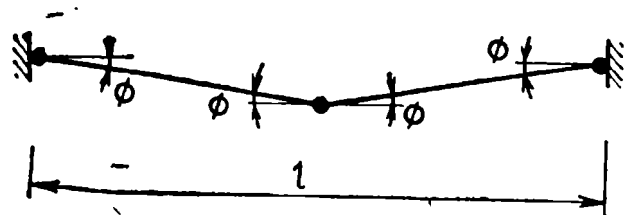


РИС. 4.36

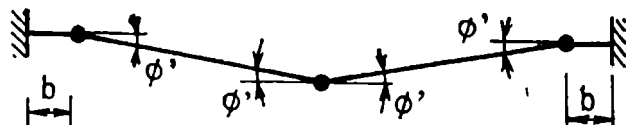


РИС. 4.37

Определим в качестве примера огнестойкость балки, представленной на рис. 4.35. Если принять, что пластические шарниры образуются на концах балки, то получим схему разрушения, приведенную на рис. 4.36.

Согласно теореме о виртуальных работах, работа пластических моментов, равная работе внешних сил, выражается в виде

$$4M_p \Phi = 2p_u \frac{l}{2} \frac{l}{4} \Phi, \quad (4.75)$$

откуда

$$p_u = 16M_p/l^2. \quad (4.76)$$

В действительности пластические шарниры образуются вне зоны соединения, хотя и рядом с ней. В связи с этим схема разрушения балки будет соответствовать представленной на рис. 4.37.

Тогда, согласно теореме о виртуальных работах,

$$p'_u = 4M_p (l/2 - b)^2. \quad (4.77)$$

Если принять  $M_p = 10$  т/м,  $l = 6$  м,  $b = 0,3$  м и  $p = 1,9$  т/м, то в первом случае получим температуру разрушения  $572^\circ\text{C}$ , а во втором —  $616^\circ\text{C}$ , т. е. задержку разрушения на  $44^\circ\text{C}$  за счет учета соединения.

**Примечание.** Вышеизложенный материал показывает, каким образом можно оценить температуру разрушения стальной конструкции в качестве дополнения к расчету нагрева, приведенному в разд. 4.3. Если температура разрушения оказывается ниже температуры, достигаемой в течение требуемого по нормам времени (предела огнестойкости), или максимальной температуры, достигаемой при реальном пожаре (гл. 2), то такая конструкция является неудовлетворительной. Но вместе с тем было бы ошибкой полагать, что единственным решением является нанесение защитных материалов или покрытий на всю конструкцию (разд. 4.2). В ряде случаев можно избежать устройства такой защиты в результате разумного конструирования всей системы.

Прежде всего следует избегать стеснения температурных деформаций, чего довольно трудно добиться для сжатых элементов и сравнительно легко для изгибаемых. В частности, следует особо тщательно рассматривать случаи, когда металлическая конструкция опирается на каменную или бетонную конструкцию, ибо последняя, особенно будучи очень жесткой, может способствовать преждевременному выходу металлической конструкции из строя.

Статически неопределимые конструкции являются предпочтительными по сравнению со статически определимыми, так как коэффициент статической неопределимости  $\chi$  снижает отношение  $P/P_u$  и, следовательно, повышает температуру, при которой происходит разрушение. Разумеется, если конструкция рассчитана с учетом пластических деформаций в холодном состоянии, то это примечание теряет смысл.

Любое уменьшение нагрузки и любое завышение сечений элементов, способствующее снижению максимального напряжения, является благоприятным фактором с точки зрения огнестойкости.

Следует также стремиться к применению марок стали с более высоким пределом текучести.

Наконец, можно также «играть» коэффициентом формы: чем он выше, тем выше и температура разрушения. Однако для обычно применяемых профилей его изменения незначительны (от 1,1 до 1,24). Кроме того, коэффициент формы никогда не является определяющим при выборе профиля, в связи с чем эта последняя мера является, по существу, иллюзорной.

Эти замечания показывают, что проблему пожара следует учитывать на стадии предварительного проектирования, а ни в коем случае не после того, как конструкция уже запроектирована и рассчитана.

## 4.5. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Несколько примеров расчета были рассмотрены выше (разд. 4.4.3—4.4.5), поэтому ограничимся лишь рассмотрением различных этапов расчета толщины защитных слоев.

**4.5.1. Статически неопределимая балка.** Пусть балка, изображенная на рис. 4.38, загружена равномерно распределенной постоянной и временной нагрузками, интенсивность которых составляет соответственно  $G = 400$  кгс/м и  $Q_d = 800$  кгс/м.

**К р и т и ч е с к а я   т е м п е р а т у р а.** Расчетная нагрузка составляет  $400 \cdot 1,1 + 800 \cdot 0,7 = 1000$  кгс/м (разд. 4.4.2.2).

В результате расчета по нормам расчета металлических конструкций (СМ 66) получим, что балка может представлять собой прокатный профиль HEA 200 из стали E 24.

Момент сопротивления ( $J/v$ ) этого профиля в упругой стадии равен  $325$  см<sup>3</sup>, поэтому максимальное напряжение в сечении составляет  $\sigma = 1156,8$  кгс/см<sup>2</sup>.

Далее с помощью формулы (4.56)  $\sigma_e(\theta_r)/\sigma_e = \sigma/f\chi\sigma_e = P/P_u$  определим кри-

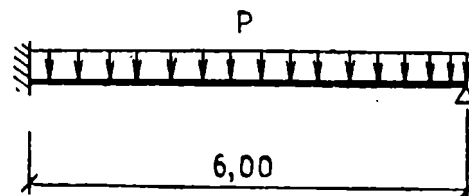


РИС. 4.38

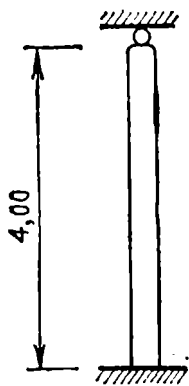


РИС. 4.39

тическую температуру. Для профиля НЕА 200 коэффициент формы  $f = (J/v)/Z = 1,105$ , коэффициент статической неопределимости  $\chi = 1,5$  и  $\sigma_e = 2400$  кгс/см<sup>2</sup> (в прил. 3 к настоящей главе приведены таблицы коэффициентов статической неопределимости). Отсюда  $P/P_u = \sigma_e(\theta_r)/\sigma_e = 0,29$ .

Значение  $\theta_r$  следует определять по формуле (4.35), поскольку при  $P/P_u < 0,38$

$$\theta_r = \frac{240P/P_u + 340}{(P/P_u) + 0,34},$$

т. е.  $\theta_r = 650^\circ \text{C}$ .

**Нагрев.** Коэффициент массивности незащищенного, нагреваемого со всех сторон профиля составляет  $211,9 \text{ м}^{-1}$  (см. прил. 2 к настоящей главе).

С помощью табл. 4.1 найдем, что эта балка выдерживает лишь около 13 мин в условиях стандартного пожара (за этот срок она достигнет критической температуры  $650^\circ \text{C}$  с учетом массивности профиля).

Для расчета огнестойкости в течение 1 ч путем защиты металлического профиля со всех сторон (см. рис. 4.1, б) материалом, имеющим теплопроводность около  $0,1 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot ^\circ \text{C})$ , обратимся к табл. 4.2б.

Можно констатировать, что при коэффициенте массивности  $145 \text{ м}^{-1}$  (см. прил. 2) требуется термическое сопротивление  $(e/\lambda)$  около  $0,1 \text{ м}^2 \times \times \text{ч} \cdot ^\circ \text{C}/\text{ккал}$  для того, чтобы температура элемента была ниже его критической температуры ( $650^\circ \text{C}$ ) по истечении 1 ч стандартного пожара. Таким образом, толщина защитного слоя составляет  $e = 0,1 \cdot 0,1 = 0,01 \text{ м}$ .

**4.5.2. Колонна.** Пусть в основании имеется колонна с шарнирным соединением на верхнем конце (рис. 4.39). Осевые нагрузки составляют: собственный вес  $G = 45 \text{ тс}$ , временная нагрузка  $Q_n = 30 \text{ тс}$ , снеговая нагрузка  $S = 15 \text{ тс}$ .

1. Полная расчетная нагрузка, определенная в соответствии с нормами СМ 66, составляет  $123,75 \text{ тс}$ . Учитывая свободную длину колонны ( $4 \cdot 0,7 = 2,8 \text{ м}$ ), ее можно выполнить из профиля НЕА 220. Требуется подобрать защитный слой с тем, чтобы колонна имела огнестойкость 2 ч в условиях стандартного пожара.

Учитываемые в расчете нагрузки образуют сочетание (разд. 4.2.2)  $45 \cdot 1,1 + 30 \cdot 0,7 + 15 = 85,5 \text{ тс}$ , т. е. нормальное напряжение в колонне составляет  $\sigma = (85,5/64,3) \cdot 10^3 = 1329 \text{ кгс/см}^2$ .

По формуле (4.40)  $P/P_u = \sigma_e(\theta_r)/\sigma_e = k\sigma/\sigma_e$  при  $k = 1,123$  (по нормам СМ 66) и  $\sigma_e = 2400 \text{ кгс/см}^2$  имеем  $P/P_u = 0,621$  ( $N/N_p$ ).

Из рис. 4.21 следует, что в этом случае критическая температура равна  $457^\circ \text{C}$ .

При коробчатой защите со всех сторон коэффициент массивности профиля НЕА 220 составляет  $133,7 \text{ м}^{-1}$  (прил. 2). При применении защитного материала «Паннофэ» (прил. 1) требуется толщина  $45 \text{ мм}$  для того, чтобы по истечении 2 ч стандартного пожара температура указанного профиля оставалась ниже  $457^\circ \text{C}$ .

2. В действительности в этом случае существуют строгие ограничения габаритов защищаемой колонны: максимальные размеры не должны превышать 260 мм.

Какое решение необходимо принять для соблюдения этого условия, если при такой защите профиля НЕА 220 его ширина составит  $220 + 2 \times 45 = 310$  мм?

Замена профиля НЕА 220 на НЕВ 200 удовлетворяет указанному требованию. Во-первых, при этом повышается температура разрушения, ибо напряжение теперь составляет  $\sigma = 1094$  кгс/см<sup>2</sup>, откуда  $P/P_u = 0,524$  и, следовательно,  $\theta_r = 518$  °С. Во-вторых, повышается массивность профиля: при коробчатой защите профиля НЕВ 200 со всех сторон его коэффициент массивности составляет 102,4 м<sup>-1</sup>.

Таким образом, основываясь на данных прил. 1, можно констатировать, что толщина защитного слоя 30 мм из материала «Паннофэ» достаточна для обеспечения огнестойкости колонны в течение 2 ч. При нанесении защитного материала в виде штукатурки достаточной оказывается толщина 27 мм, однако плитки имеют установленную (фиксированную) толщину, поэтому для защиты следует принять толщину, ближайшую к найденной расчетным путем.

Таким образом, максимальный размер сечения колонны составляет  $200 + 2 \cdot 30 = 260$  мм.

#### 4.6. НЕРАВНОМЕРНЫЙ НАГРЕВ КОНСТРУКЦИИ

**4.6.1. Общие положения.** Простейшая гипотеза о равномерности распределения температур в конструкции в любой момент времени часто оказывается далекой от реальности. И действительно, во время пожара наблюдаются изменения двух типов: во-первых, изменения распределения температур, вызванные нарушениями равномерного нагрева ввиду наличия стен, перегородок, перекрытий и пр., и, во-вторых, изменения распределения температур, обусловленные рассмотренными методами защиты (частичная защита, наружные конструкции).

Метод частичной защиты заключается в том, что защите от нагрева подлежат лишь те части конструкции, которые испытывают наибольшую тепловую или механическую нагрузку. Очевидно, что температура таких конструкций не может быть однородной.

Аналогичным образом в наружных конструкциях, подверженных главным образом излучению от фронта пламени, возникают значительные температурные градиенты.

Ниже будут рассмотрены возможные средства исследования применения таких конструкций, которые во многих случаях нет необходимости полностью покрывать защитным материалом, являющимся одновременно и достаточно дорогим, и малоэстетичным.

**4.6.2. Плиты перекрытий.** При пожаре верхняя полка металлической балки, на которую опирается плита перекрытия, нагревается медленнее, чем нижняя полка, так как она имеет меньшую поверхность, обращенную к огню, а также вследствие переноса тепла к более холодной плите (рис. 4.40). При температуре нижней полки порядка 600 °С температура верхней полки может быть примерно на 200 °С ниже.

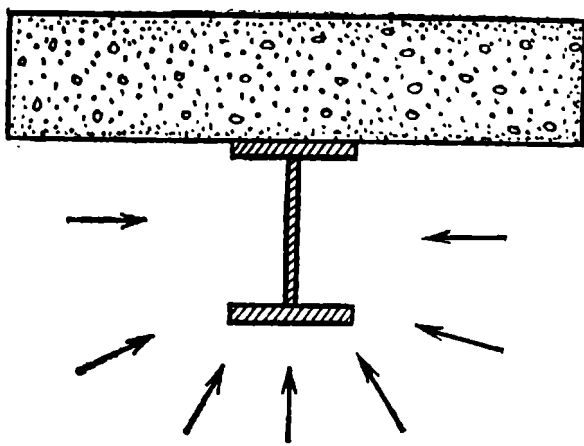


РИС. 4.40

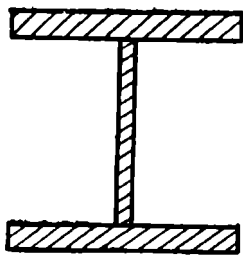


РИС. 4.41

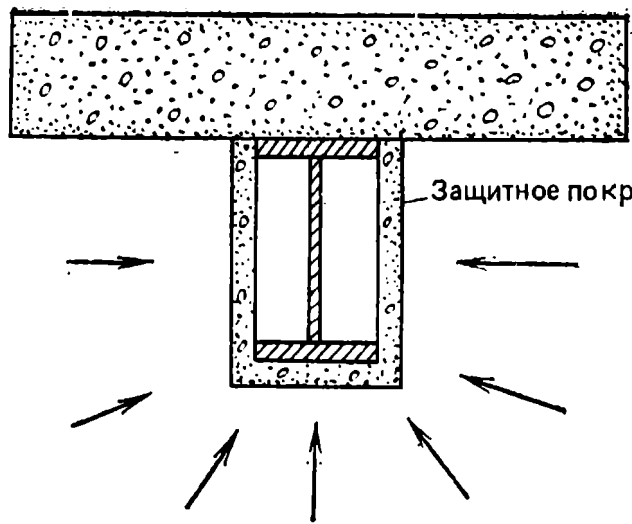
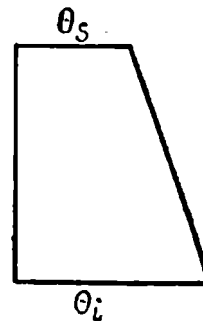
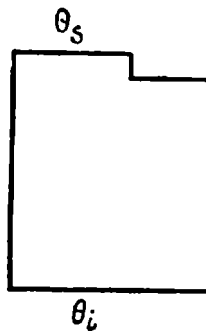


РИС. 4.42



Предельный момент, воспринимаемый металлической балкой, зависит, очевидно, от распределения температур по ее поперечному сечению. Опыт показывает, что если профиль не защищен или защищен по всему периметру (набрызгом), то можно считать, что температуры стенки и нижней полки одинаковы, а температура верхней полки несколько ниже (рис. 4.41). Напротив, если металлический элемент заключен в коробчатую защитную оболочку (рис. 4.42), то градиент температур имеет приблизительно линейный характер.

Пусть имеется какое-либо твердое тело. Его пластический момент  $M_p$  относительно оси  $x'$ ,  $x$ , перпендикулярной плоскости изгиба, составляет

$$M_p = \int_S |y| \sigma_e dS, \quad (4.78)$$

Если температура является однородной по всему объему тела, то выражение (4.78) можно привести к виду

$$M_p(\theta) = \sigma_e(\theta) \int \int_S |y| dS, \quad (4.79)$$

причем  $Z = \int \int |y| dS$  представляет собой пластический момент сопротивления и характеризует геометрические размеры сечения.

Напротив, если в разных точках рассматриваемого сечения твердого тела температура неодинакова, то уравнение (4.78) нельзя упростить до вида (4.79). В этом случае приходится прибегать к методу, зависящему от характера распределения температур. Такой весьма сложный расчет необходимо в этом случае проводить для профилей любого типа. В качестве примера на рис. 4.43 и 4.44 представлены результаты тако-

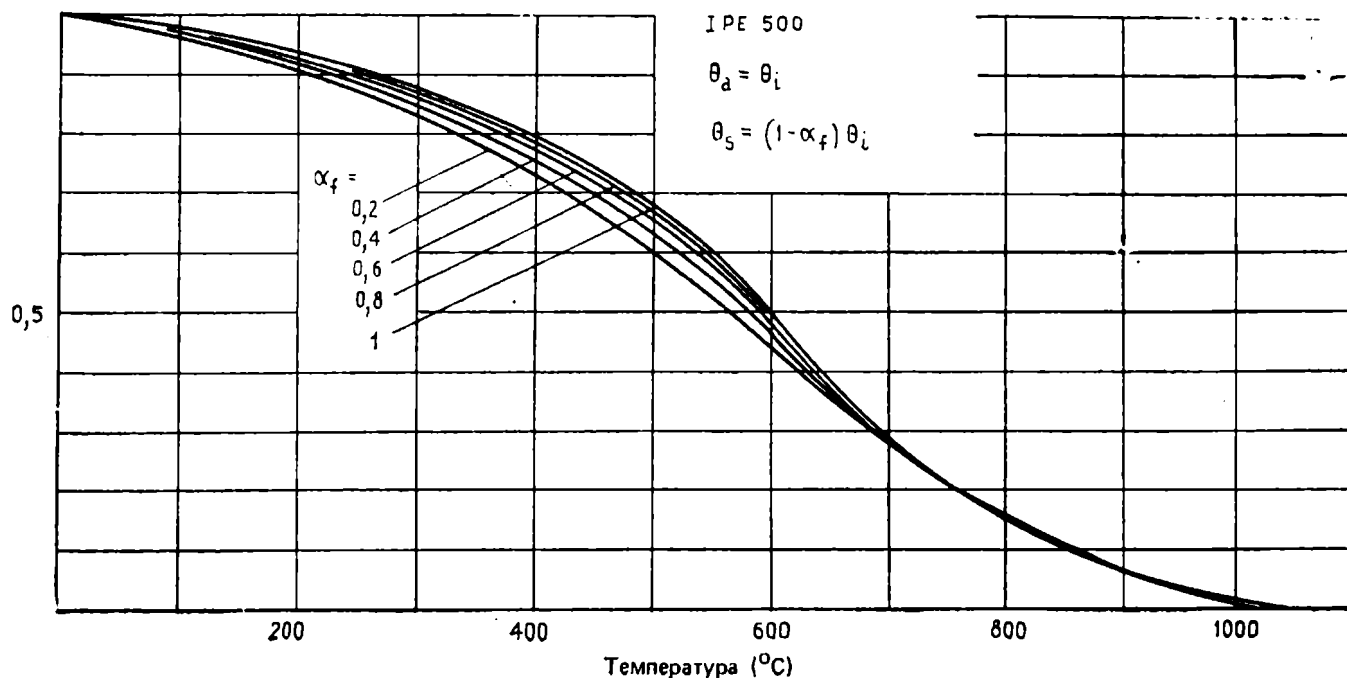


РИС. 4.43

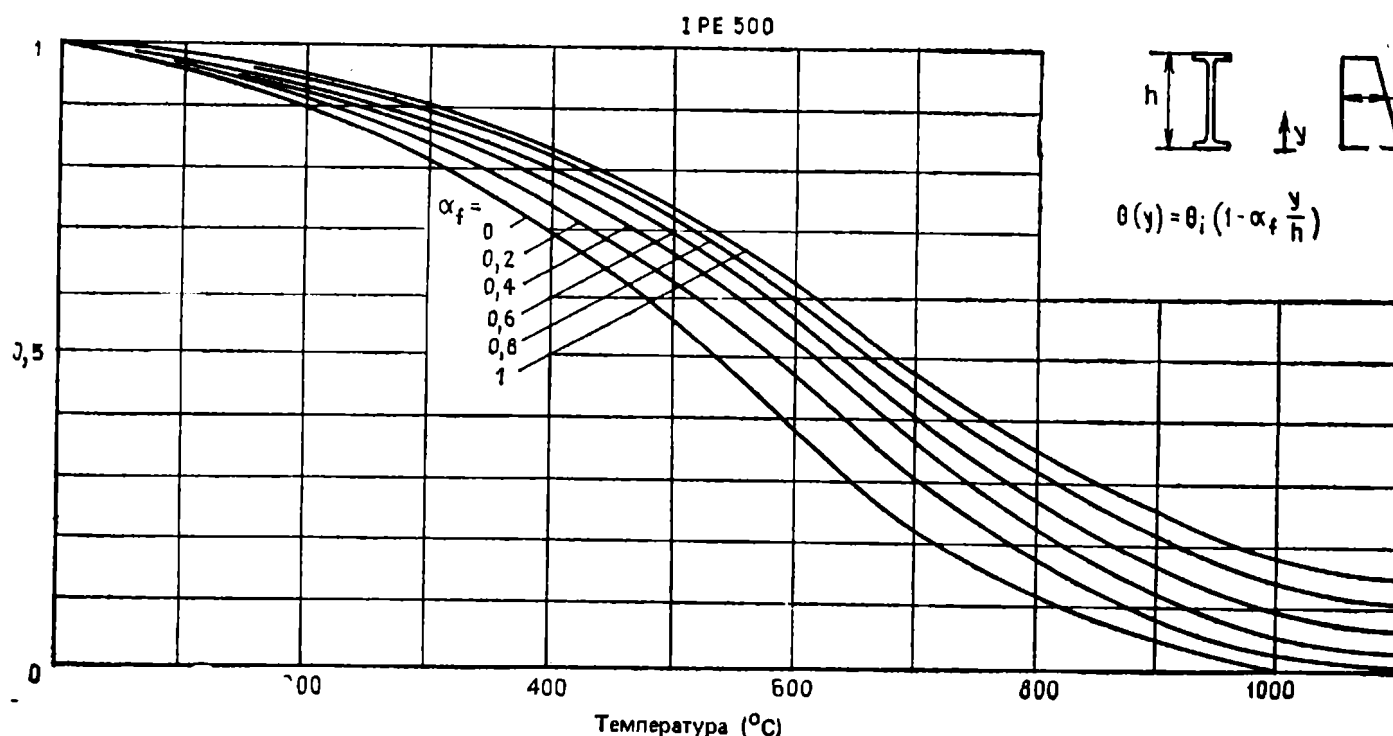
 $M_p(\theta) / M_p$ 


РИС. 4.44

го расчета для профиля ГРЕ 500 в виде относительного изменения пластического момента в зависимости от температуры и характера ее распределения, определяемого параметром  $\alpha_f = (\theta_i - \theta_s) / \theta_i$ , где  $\theta_i$  и  $\theta_s$  — температура соответственно нижнего и верхнего волокон профиля.

Величину пластического момента  $M_p(\theta, \alpha_f)$  можно приближенно определять для любого профиля по нижеследующим формулам:

при линейном распределении температуры

$$M_{p1}(\theta, \alpha_f) = M_p [(0,52\alpha_f^2 + 2\alpha_f + 5,2) 10^{-4} \theta_i + 1]; \quad (4.80)$$

$$M_{p2}(\theta, \alpha_f) = M_p [(3,66\alpha_f^2 + 0,236\alpha_f + 14,71) 10^{-4} \theta_i - 0,314\alpha_f^2 + 0,26\alpha_f + 1,28];$$

$$M_p(\theta, \alpha_f) = \min(M_{p1}, M_{p2}); \quad (4.81)$$

при распределении температуры в двух зонах с одинаковой температурой

$$\begin{aligned} M_{p1}(\theta, \alpha_f) &= M_p (1,21\alpha_f^2 + 0,34\alpha_f - 5,15) 10^{-4}\theta_i + 1]; \\ M_{p2}(\theta, \alpha_f) &= M_p (1,36\alpha_f^2 - 2,7\alpha_f - 14,57) 10^{-4}\theta_i - \\ &\quad - 0,21\alpha_f^2 + 0,36\alpha_f + 1,27] \end{aligned} \quad (4.83)$$

и

$$M_p(\theta, \alpha_f) = \min(M_{p1}, M_{p2}).$$

В этих формулах  $M_p$  означает пластический момент при нормальной температуре ( $M_p = Z\sigma_e$ ). Формулы (4.82) и (4.83) действительны только при  $\alpha_f \leq 0,8$ . При  $0,8 < \alpha_f \leq 1$  принимается  $\alpha_f = 0,8$ , что не приводит к существенной ошибке, так как изменение величины  $M_p(\theta)/M_p$  в диапазоне от 0,8 до 1 невелико (см. рис. 4.43). Кроме того, формулы (4.81) и (4.83) при  $M_p(\theta)/M_p$  дают несколько заниженные результаты.

Наконец, укажем, что приведенные четыре формулы не дают строго одинаковых результатов при  $\alpha_f = 0$  (однородная температура). При этом формулы (4.80) и (4.81) обеспечивают результаты, несколько более близкие к действительности (см. рис. 4.51).

Разумеется, пользование этими формулами требует предварительного определения величины  $\alpha_f$ . Ее можно получить только путем испытания на нагрев или путем расчета, в котором по отдельности рассматриваются обе полки с их собственными коэффициентами массивности ( $1/e$  для верхней полки и  $2/e$  для нижней полки в случае отсутствия защиты или наличия защиты по периметру сечения профиля). В гл. 5 (разд. 5.3.1) читатель найдет более подробные сведения об этом расчете.

**4.6.3. Стены.** Рассмотрим конструкцию, изображенную на рис. 4.45. Перегородки 1 и 3, имеющие некоторую степень огнестойкости CF, ограничивают зону, охваченную пожаром. Предполагается, что вследствие осевого теплопереноса в балке опорные зоны над этими перегородками будут иметь несколько меньшую температуру, чем середины пролетов.

Кроме того, стенка 2 искажает конвективные потоки и образует экран-преграду для излучения исходящего от источника огня. В результате этого над средней опорой в балке также имеют место более низкие температуры.

Такие продольные градиенты имеют большое значение и могут оказывать значительное влияние на огнестойкость балки. Предположим, что расчет с учетом пластических деформаций показывает, что при разрушении балки первый пластический шарнир образуется на средней опоре. Меньший нагрев этой зоны может либо задержать образование пластического шарнира, либо сдвинуть его в более горячую зону. В обоих случаях повышается время до разрушения балки в условиях пожара.

В качестве примера в табл. 4.4 приведено сравнение предела огнестойкости, зафиксированного в условиях стандартного пожара для балки, схематически показанной на рис. 4.46. Балка имеет общую эпо-

Таблица 4.4

| Профиль | $P/P_u$ | Защита                | Эксперимент                             |                                      | Расчет                                  |                                      |
|---------|---------|-----------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|
|         |         |                       | темпера-<br>тура раз-<br>рушения,<br>°С | предел<br>огнестой-<br>кости,<br>мин | темпера-<br>тура раз-<br>рушения,<br>°С | предел<br>огнестой-<br>кости,<br>мин |
| НЕВ 220 | 0,396   | Незначит.             | 720                                     | 21                                   | 590                                     | 13                                   |
| —       | 0,434   | } Вермикулит<br>25 мм | 655                                     | 190                                  | 571                                     | 138                                  |
| —       | 0,396   |                       | 700                                     | 198                                  | 590                                     | 166                                  |
| НЕВ 180 | 0,375   |                       | 705                                     | 160                                  | 601                                     | 121                                  |

ру температур, изображенную на рис. 4.47, и предел огнестойкости, полученный расчетным путем для однородных температур. Разумеется, различия объясняются наличием не только продольного градиента, но и градиента температуры по сечению (разд. 4.6.2).

Это явление можно учесть, если известен продольный градиент. Например, имеется конструкция, изображенная на рис. 4.46, а. Если температура по всей балке одинакова, то ее разрушению соответствует механизм, схема которого изображена на рис. 4.48.

Пластический момент  $M_p$  одинаков для всех трех пластических шарниров, а разрушающая нагрузка, найденная с помощью теоремы о виртуальных работах, составляет

$$P_u = 11M_p/4l. \quad (4.84)$$

При распределении температур способом, аналогичным приведенному на рис. 4.47, возможны различные механизмы разрушения: если  $\theta_a = \theta_c$ , то механизм разрушения соответствует схеме, изображенной на рис. 4.48, а если  $\theta_a > \theta_c$  и, следовательно,  $M_p(\theta_a) < M_p(\theta_c)$ , то механизм разрушения соответствует схеме, изображенной на рис. 4.49. В обоих случаях разрушающую нагрузку можно определить с помощью теоремы о виртуальных работах.

Для механизма, показанного на рис. 4.49, работа пластических шарниров (внутренних сил) равна:

$$W_i = M_p(\theta_a)(5/3\Phi + \Phi) + M_p(\theta_b)\Phi, \quad (4.85)$$

а работа внешних сил составляет

$$W_e = (4/3\Phi) P_u(\theta) l. \quad (4.86)$$

Приравняв последние выражения, получим

$$P_u(\theta) = [8M_p(\theta_a) + 3M_p(\theta_b)]/4l. \quad (4.87)$$

где

$$\left. \begin{aligned} M_p(\theta_a) &= Z_a \sigma_e(\theta_a); \\ M_p(\theta_b) &= Z_b \sigma_e(\theta_b) \end{aligned} \right\}. \quad (4.88)$$

Формулы (4.88) действительны, если температура по сечению однородна. В противном случае следует пользоваться формулами (4.80)—(4.83).

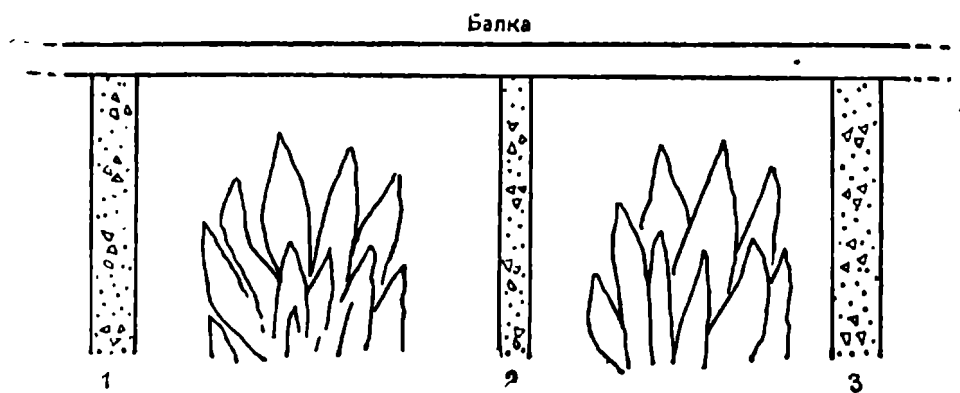


РИС. 4.45

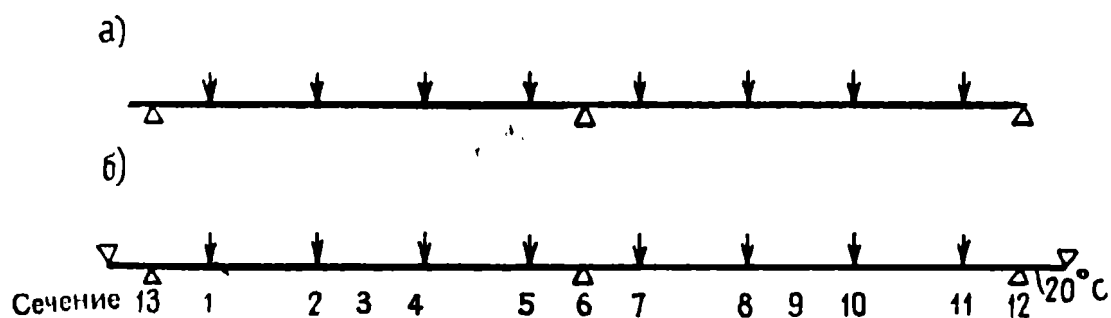


РИС. 4.46

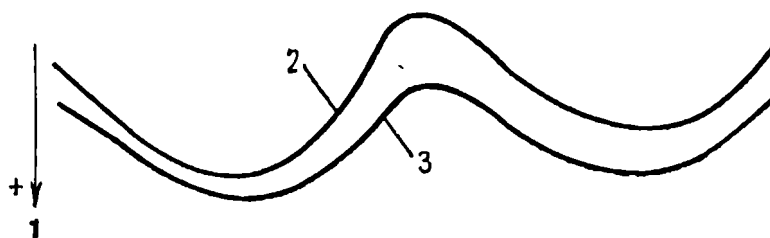


РИС. 4.47

1 — температура; 2 — верхняя полка; 3 — нижняя полка

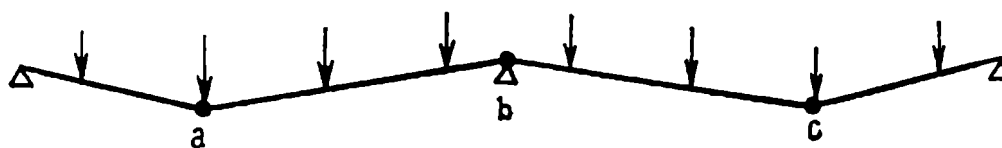


РИС. 4.48

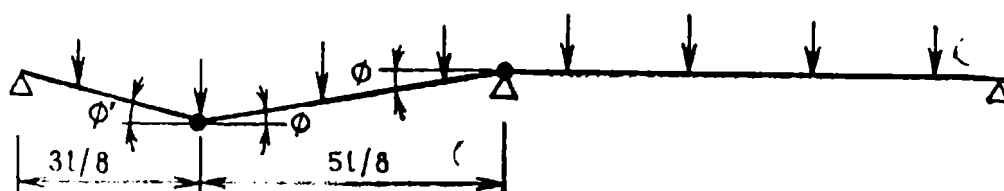


РИС. 4.49

Если возможны различные механизмы разрушения, то разрушающая нагрузка соответствует наименьшей из всех нагрузок, получаемых для различных механизмов [4.17].

**4.6.4. Частичная защита.** В настоящее время обычно защищают конструкцию целиком, не делая различий между ее больше или меньше нагруженными частями. В таких случаях повышается расход материала, как это показано

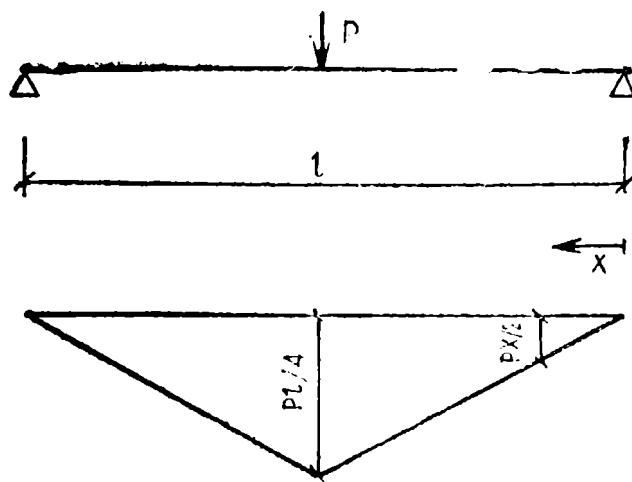


рис. 4.50

на примере статически определимой балки, нагруженной сосредоточенной силой в середине пролета (рис. 4.50).

Предположим, что эта балка должна выдерживать нагрузку в течение времени  $t$  стандартного пожара. По истечении времени  $t$  температура незащищенного профиля равна  $\theta_t$  (см. разд. 4.3.2). Поэтому следует прежде всего обеспечить огнезащиту зон, где может образоваться пластический шарнир при температуре ниже  $\theta_t$ . Огнезащиту можно рассчитать следующим образом.

При температуре  $\theta_t$  пластический момент составляет

$$M_p(\theta_t) = Z\sigma_e(\theta_t) \quad (4.89)$$

при условии, что температура однородна по всему сечению.

Следовательно, защитный материал следует наносить, лишь начиная с расстояния  $x$  от опор, которое определяется из условия  $1/2 P x = M_p(\theta_t)$ , откуда

$$x = 2M_p(\theta_t)/P. \quad (4.90)$$

Идеальный защитный слой должен при этом иметь переменную толщину от нуля на расстоянии  $x$  от опоры до такого значения в середине пролета, при котором температура в этом месте чуть ниже температуры, вызывающей образование пластических деформаций и определяемой из выражения

$$M_p(\theta) = Pl/4. \quad (4.91)$$

Разумеется, защита переменной толщины трудно выполнима с экономической точки зрения. Однако при больших пролетах целесообразно наносить защитное покрытие слоями со ступенчато изменяющейся толщиной.

Определение толщины защитного слоя значительно усложняется при переходе к статически неопределимым конструкциям, главным образом вследствие специфических закономерностей изменения предела текучести в зависимости от температуры [см. формулы (4.21) и (4.22)]. Чтобы упростить задачу, можно использовать аппроксимацию зависимости  $\sigma_e(\theta)$  двумя линейными функциями  $\theta$  (рис. 4.51).

В качестве примера на рис. 4.52, 4.53 и 4.54 приведены номограммы для случая неразрезной балки на трех опорах, изображенной на

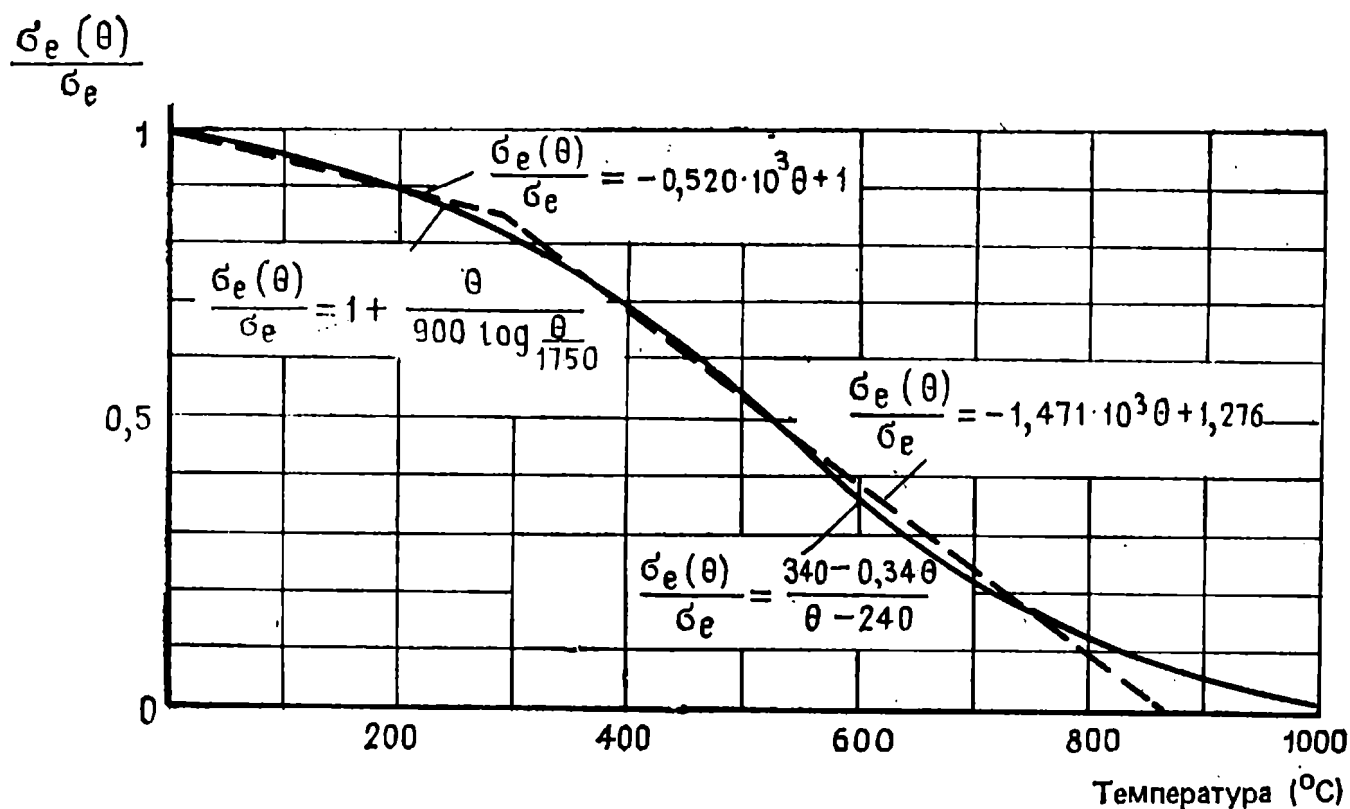


РИС. 4.51

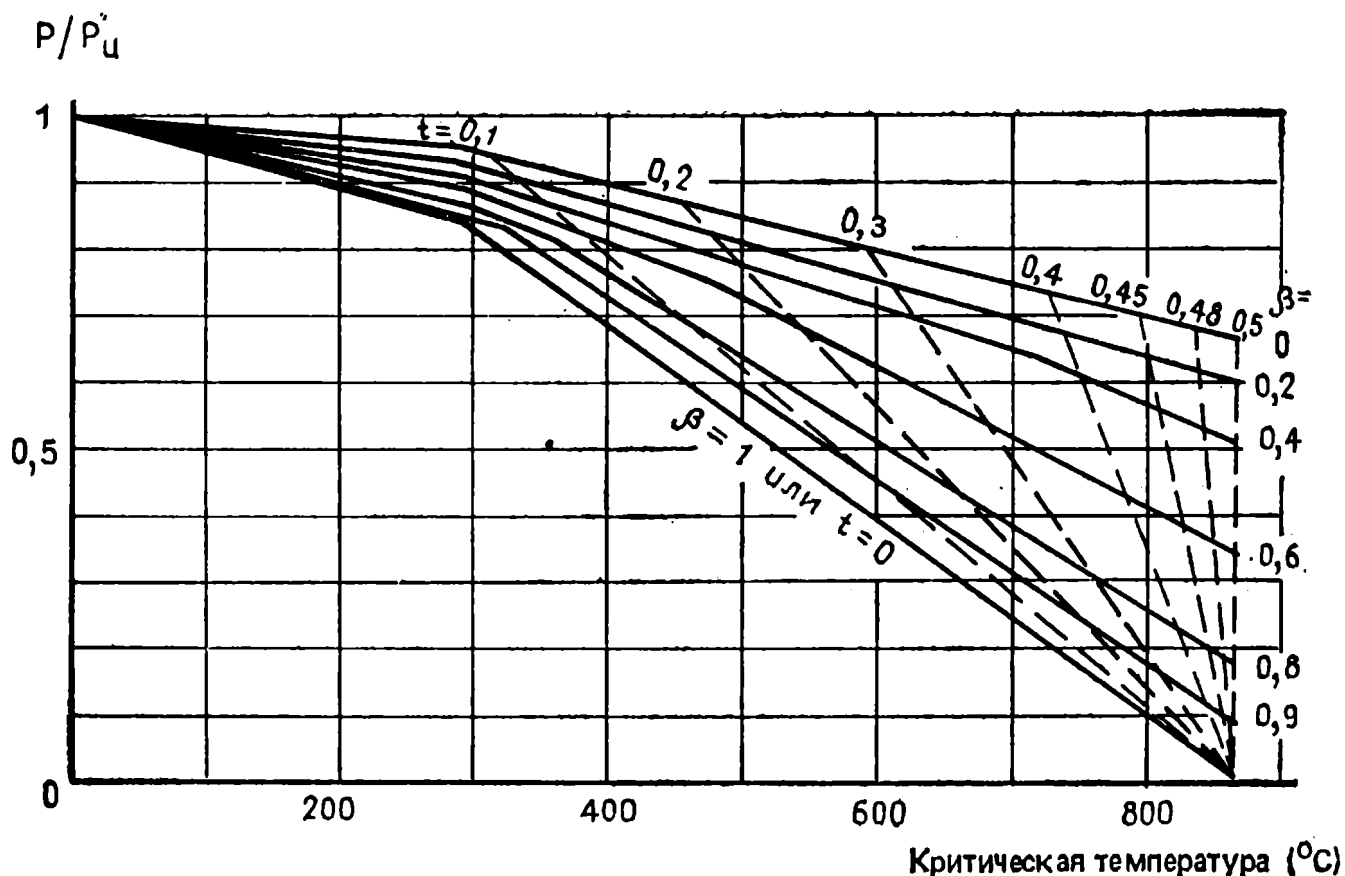


РИС. 4.52. ИЗМЕНЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ  $P/P_u$ ,  $t$  и  $\beta$  ДЛЯ БАЛКИ НА ТРЕХ ОПОРАХ, ЗАГРУЖЕННОЙ В ПРОЛЕТАХ СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ СИЛАМИ И ИМЕЮЩЕЙ ЧАСТИЧНУЮ ЗАЩИТУ (СМ. РИС. 4.55)

рис. 4.55 при различных нагружениях и различных способах частичной защиты ([4.15].

Участок  $ul$  представляет собой переходную зону между температурами незащищенной и защищенной зон. На номограммах, представленных на рис. 4.52 и 4.53, переменная  $t$  представляет собой сумму  $u + v$ .

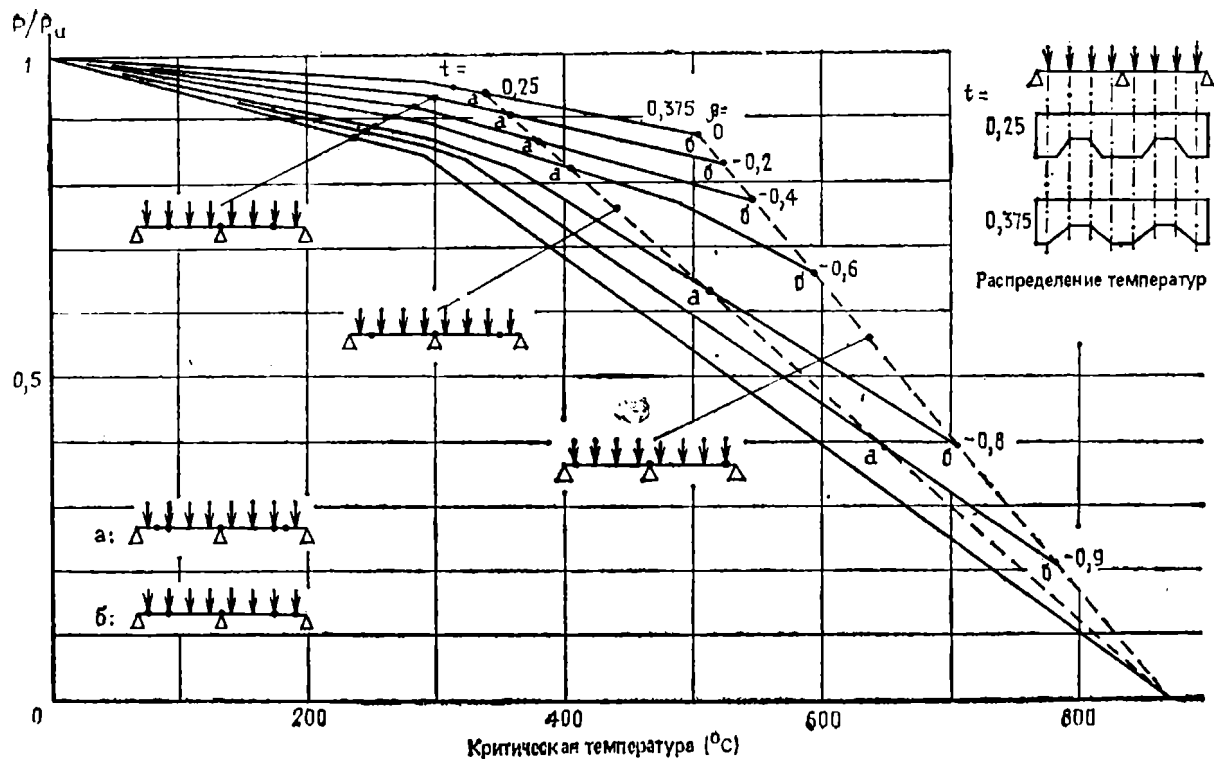
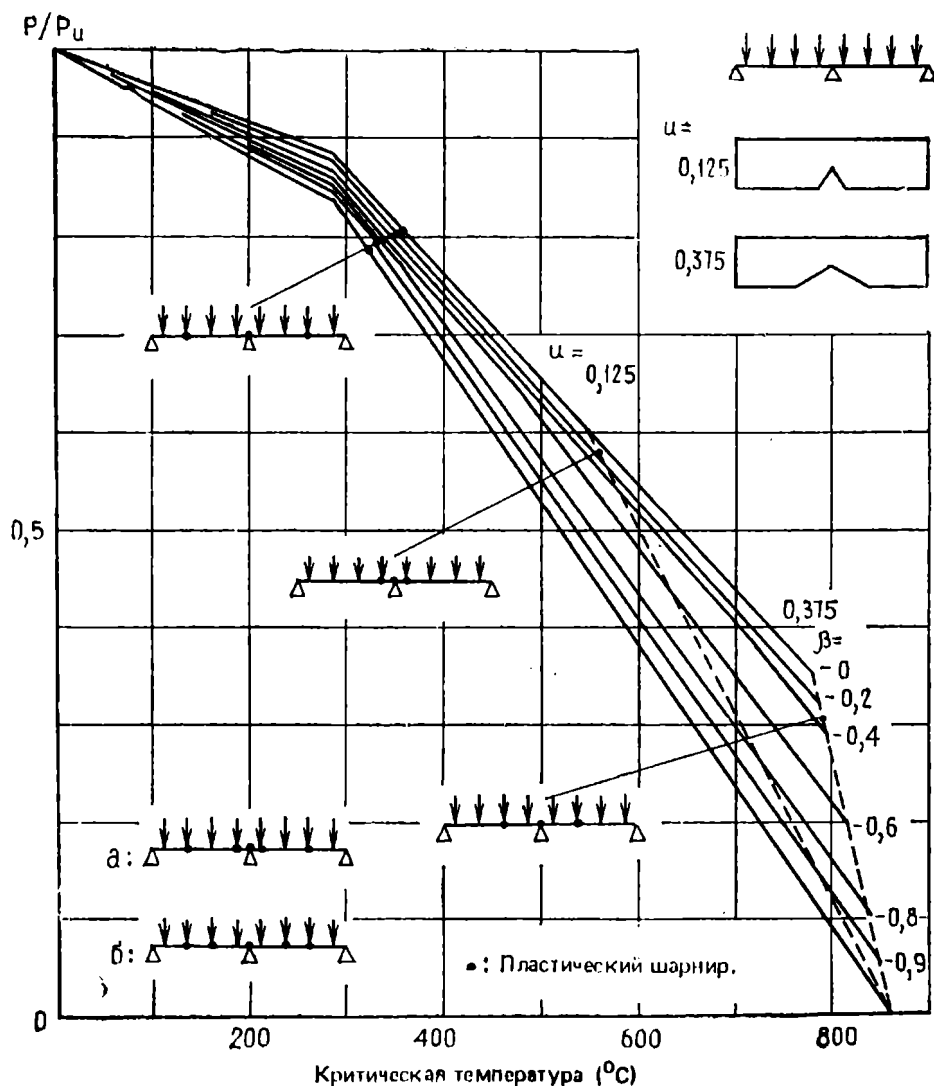


РИС. 4.53. ИЗМЕНЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ  $P/P_u$ ,  $t$  и  $\beta$  ДЛЯ НЕРАЗРЕЗНОЙ БАЛКИ НА ТРЕХ ОПОРАХ, ИМЕЮЩЕЙ ОГНЕЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ В СЕРЕДИНАХ ПРОЛЕТОВ

РИС. 4.54. ИЗМЕНЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ  $P/P_u$ ,  $u$  и  $\beta$  ДЛЯ НЕРАЗРЕЗНОЙ БАЛКИ НА ТРЕХ ОПОРАХ, ИМЕЮЩЕЙ ЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ ПО ОБЕ СТОРОНЫ ОТ СЕРЕДИНЫ ОПОРЫ



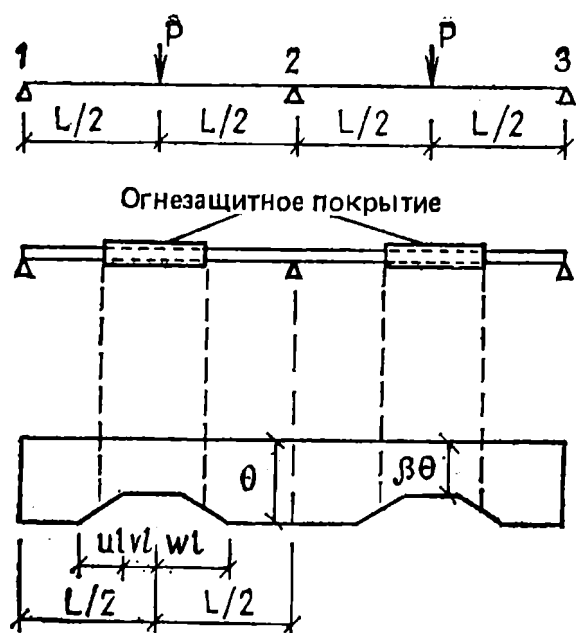


РИС. 4.55

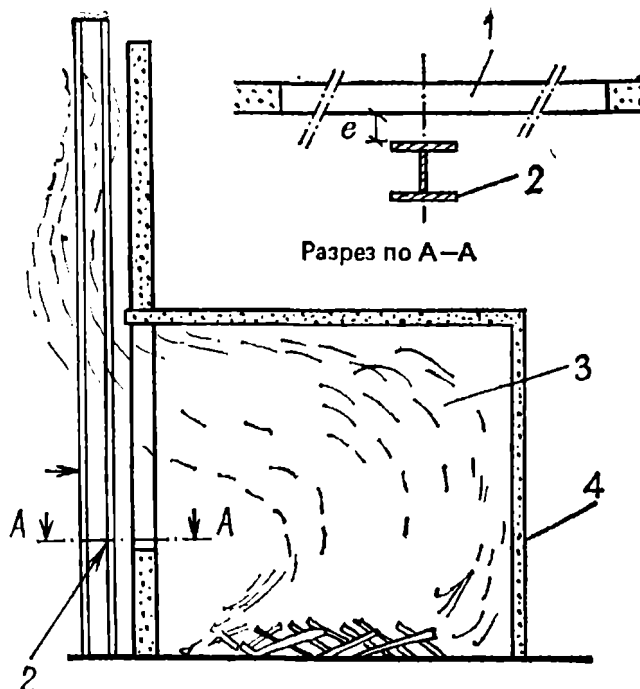


РИС. 4.56

1 — вентиляционное отверстие; 2 — металлический профиль; 3 — горячие газы и пламя; 4 — огневая камера

Номограммами (рис. 4.52—4.54) следует пользоваться следующим образом.

Предположим, что для балки, показанной на рис. 4.55,  $P/P_u = 0,53$  и ее температура достигает  $680^\circ\text{C}$  через 30 мин при отсутствии какой-либо защиты. При этом из номограммы (рис. 4.52) видно, что для достижения предела огнестойкости 30 мин  $t$  должна быть равна 0,3 и  $\beta = 0,6$ . Поэтому в середине каждого пролета на участке длины  $ul + vl = 0,3 l$  следует нанести защитный слой, обеспечивающий по истечении 30 мин температуру  $0,6 \cdot 680 = 408^\circ\text{C}$  (см. разд. 4.3.3.). Разумеется, что для достижения этого результата нет необходимости защищать 60% длины пролета, а можно защитить участок несколько меньшей длины (см. рис. 4.55).

**4.6.5. Наружные колонны.** Хотя этот архитектурный прием и обладает несомненными эстетическими и экономическими достоинствами, позволяя исключить нанесение защитных покрытий, тем не менее этому вопросу посвящено мало исследований, в связи с чем отсутствует какой-либо метод их расчета.

Во Франции были проведены многочисленные испытания на нагрев металлических колонн при отсутствии нагрузки в условиях естественного пожара (источник огня — дерево) [4.19]. На рис. 4.56 показана экспериментальная установка, а на рис. 4.57 даны экспериментальные кривые температура — время, полученные для различных точек во время испытаний. Изменение температур по длине колонны в момент достижения в ней максимальной температуры имеет вид, представленный на рис. 4.58.

Результаты этих испытаний, упомянутых также в гл. 2 (разд. 2.2), сведены в табл. 4.5, где приведены температуры, достигнутые в обеих полках профиля НЕВ 240, расположенного на расстоянии  $e = 100$  мм

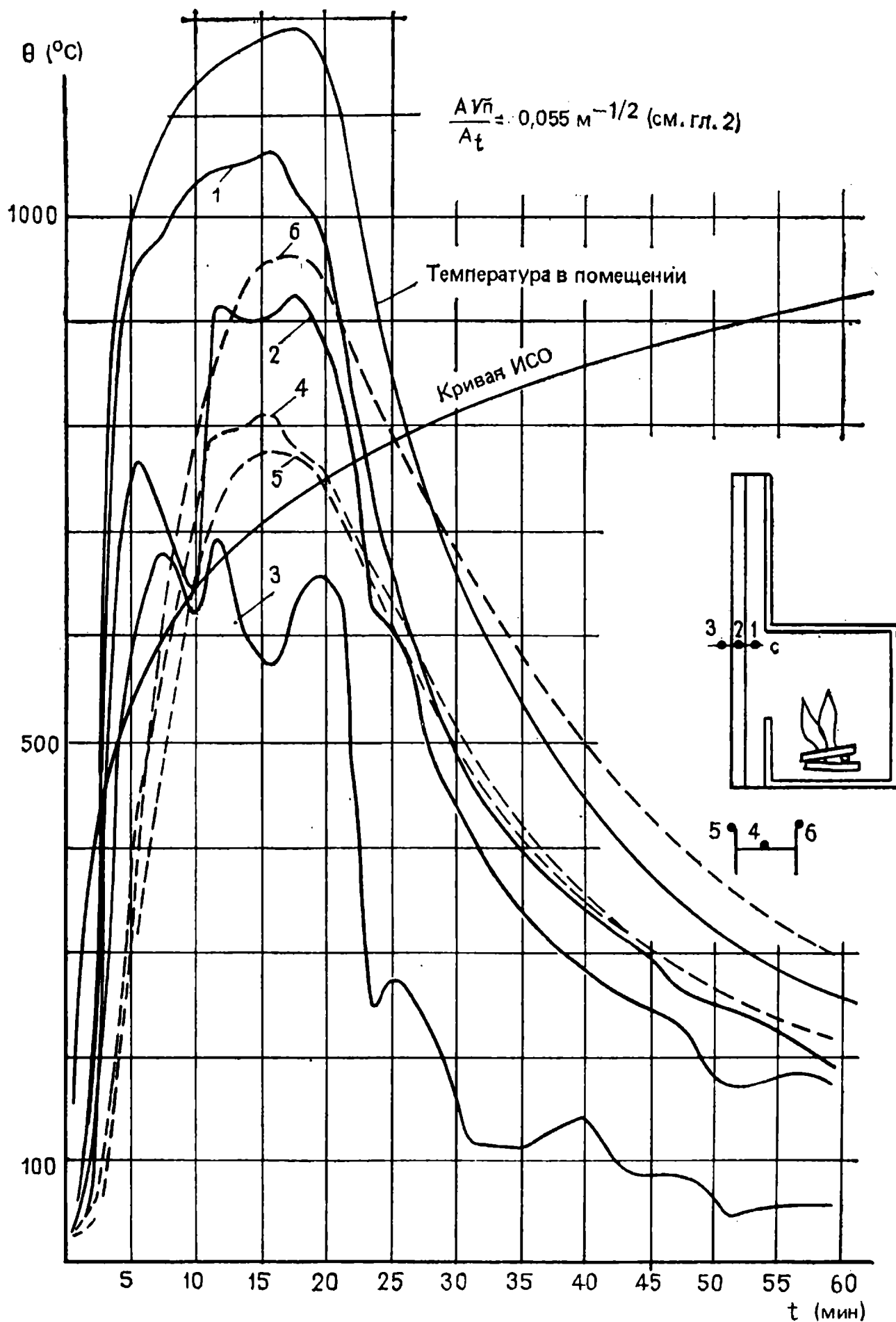


РИС. 4.57. ТЕМПЕРАТУРА В ТЕЛЕ КОЛОННЫ И ВОКРУГ НЕЕ (СЕЧЕНИЕ  $c$ ) ПРИ ПОЖАРНОЙ НАГРУЗКЕ ( $40 \text{ кг/м}^2$ ) И КОЭФФИЦИЕНТЕ ПРОЕМНОСТИ 25% (ИСПЫТАНИЕ 20)

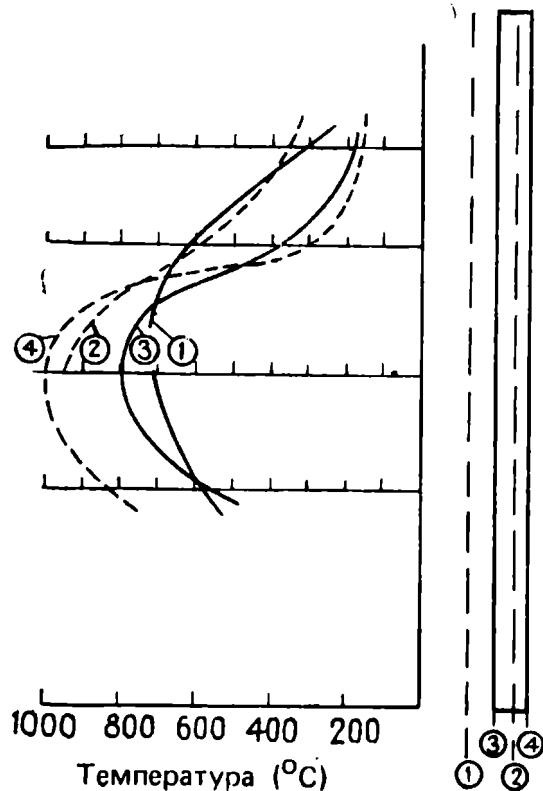


РИС. 4.58. НАИБОЛЬШИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СНАРУЖИ (1 И 2) И В ТЕЛЕ КОЛОННЫ (3 И 4) ПРИ ПОЖАРНОЙ НАГРУЗКЕ 40 кг/м<sup>2</sup> И КОЭФФИЦИЕНТЕ ПРОЕМНОСТИ 25% (ИСПЫТАНИЕ 20)

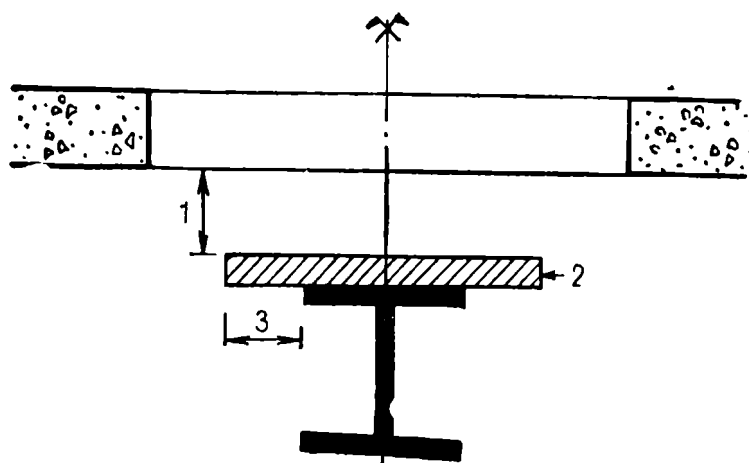


РИС. 4.59

1 — расстояние от стены; 2 — экран; 3 — вынос

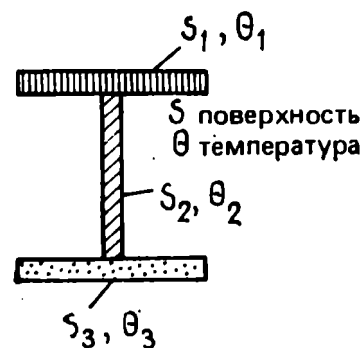


РИС. 4.60

от наружной стены (рис. 4.56). Температура стенки близка к температуре наружной полки. Некоторый запас обеспечивается, если принимать в расчетах температуру стенки, равную полусумме температур полок.

Ряд испытаний был проведен с использованием вертикального экрана для защиты колонны (рис. 4.59). В качестве экрана применялись либо плита из вермикулита, либо два стальных листа толщиной 1 мм, расположенных на расстоянии 1 см один от другого. Во всех указанных испытаниях проемность составляла 25% фронтальной поверхности испытательной огневой камеры. Удаление колонны от стены и вынос экрана варьировались. Результаты испытаний приведены в табл. 4.6.

Как правило, температура стенки очень близка к температуре наружной полки. При условии знания максимальных температур, достигаемых в профиле, в зависимости от его удаления от фасада и возможной защиты излагаемый ниже метод дает возможность приблизительно оценить несущую способность колонны.

**Таблица 4.5. Максимальные температуры полки металлической колонны, не защищенной экраном**

| №  | Температура, °С |                  |                | №  | Температура, °С |                  |                |
|----|-----------------|------------------|----------------|----|-----------------|------------------|----------------|
|    | камеры          | внутренней полки | наружной полки |    | камеры          | внутренней полки | наружной полки |
| 1  | 795             | 540              | 325            | 16 | 850             | 510              | 375            |
| 2  | 560             | 280              | 245            | 17 | 1143            | 825              | 685            |
| 3  | 850             | 605              | 510            | 20 | 1195            | 965              | 770            |
| 4  | 1055            | 875              | 785            | 21 | 1222            | 975              | 680            |
| 5  | 375             | 205              | 170            | 22 | 446             | 235              | 190            |
| 6  | 740             | 480              | 370            | 23 | 587             | 340              | 270            |
| 7  | 944             | 720              | 600            | 24 | 747             | 445              | 350            |
| 8  | 258             | 150              | 100            | 25 | 887             | 560              | 455            |
| 9  | 518             | 345              | 220            | 26 | 1005            | 680              | 515            |
| 10 | 858             | 636              | 465            | 27 | 1136            | 905              | 770            |
| 11 | 471             | 305              | 215            | 28 | 407             | 190              | 130            |
| 12 | 762             | 605              | 480            | 29 | 507             | 280              | 205            |
| 13 | 725             | 450              | 325            | 30 | 740             | 400              | 305            |
| 14 | 1050            | 745              | 530            | 31 | 1020            | 705              | 585            |
| 15 | 690             | 285              | 170            |    |                 |                  |                |

Считается, что в пределах полки температура одинакова, а в стенке она либо изменяется по линейному закону, либо однородна. Независимо от принятых условий (рис. 4.60) температура стенки обозначается  $\theta_2$ .

**Таблица 4.6. Максимальные температуры полки металлической колонны, защищенной экраном**

| №  | Пожарная нагрузка, кг/м² | e, см | Экран, мм     | d, см | Максимальные температуры, °С |                  |                |
|----|--------------------------|-------|---------------|-------|------------------------------|------------------|----------------|
|    |                          |       |               |       | камеры                       | внутренней полки | наружной полки |
| 18 | 30                       | 10    | 15 мм*        | 6     | 1096                         | 320              | 505            |
| 19 | 30                       | 10    | —             | 12    | 1119                         | 280              | 350            |
| 32 | 30                       | 15    | 20*           | 6     | 1120                         | 370              | 505            |
| 33 | 30                       | 15    | —             | 12    | 1170                         | 430              | 300            |
| 34 | 60                       | 15    | —             | 12    | 1275                         | 560              | 690            |
| 35 | 30                       | 30    | Стальной лист | 12    | 1110                         | 300              | 275            |
| 36 | 30                       | 30    | 20*           | 6     | 1180                         | 235              | 330            |
| 37 | 60                       | 30    | Стальной лист | 12    | 1270                         | 705              | 655            |
| 38 | 60                       | 30    | 20*           | 6     | 1270                         | 510              | 625            |
| 39 | 60                       | 45    | —             | 6     | 1275                         | 450              | 330            |
| 40 | 60                       | 45    | —             | 0     | 1250                         | 600              | 540            |
| 41 | 60                       | 45    | Стальной лист | 6     | 1265                         | 625              | 625            |

\* Плита из вермикулита.

Обозначения: e — расстояние от экрана до стены; d — вынос экрана.

1. Простое сжатие. Разрушающую нагрузку можно определить по формуле

$$N_p(\theta) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^3 S_i \sigma_e(\theta_i), \quad (4.92)$$

где  $k$  — коэффициент продольного изгиба при нормальной температуре.

2. Сжатие с изгибом. При этом следует использовать одну из нижеприведенных формул (см. разд. 4.4.3.5):

$$M = t \left( 1 - \frac{N}{N_p(\theta)} \right) M_p(\theta); \quad (4.93)$$

$$M = \frac{1}{k_f} \left( 1 - k_0 \frac{N}{N_p(\theta)} \right) M_p(\theta), \quad (4.94)$$

где  $M_p(\theta)$  можно определить по формулам (4.80)—(4.83), а  $N_p(\theta)$  найти по формуле (4.92).

При такой постановке задачи не учитывается целый ряд явлений, например различные характеристики температурной деформации разных материалов, зависимость коэффициента продольного изгиба от температуры и пр. На основе проводимых в настоящее время исследований для указанных случаев будут разработаны достаточно строгие методы расчета.

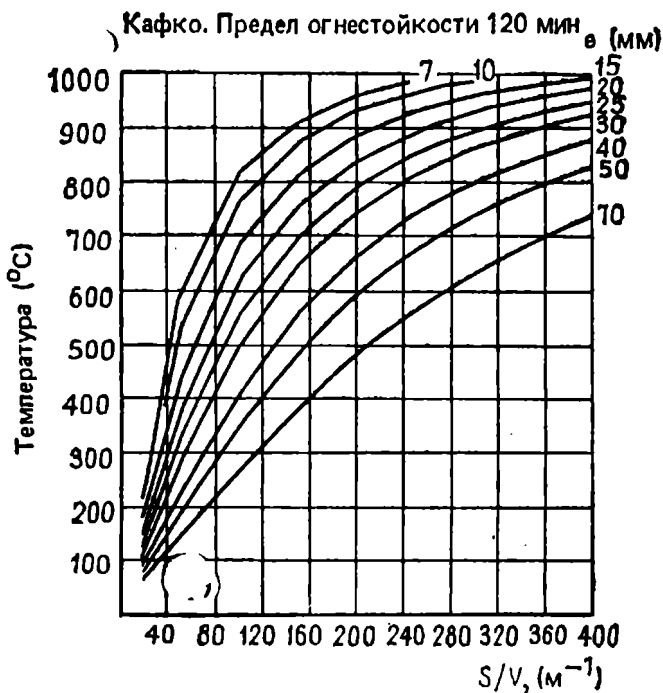
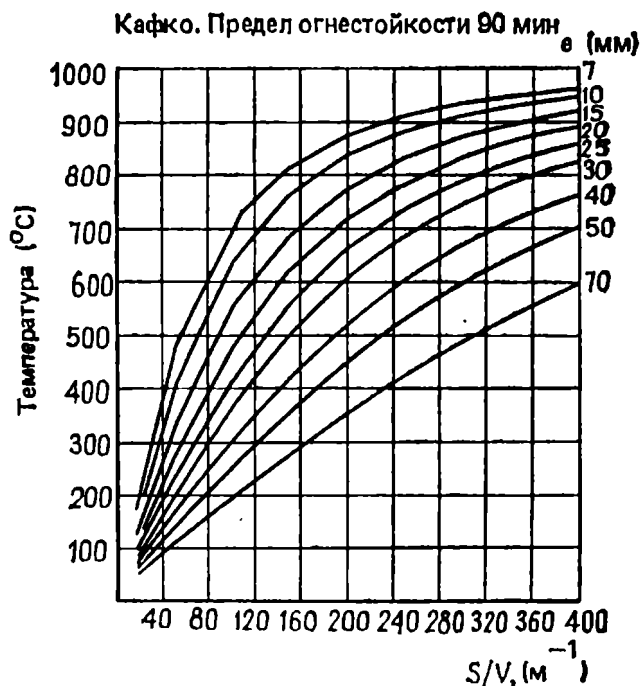
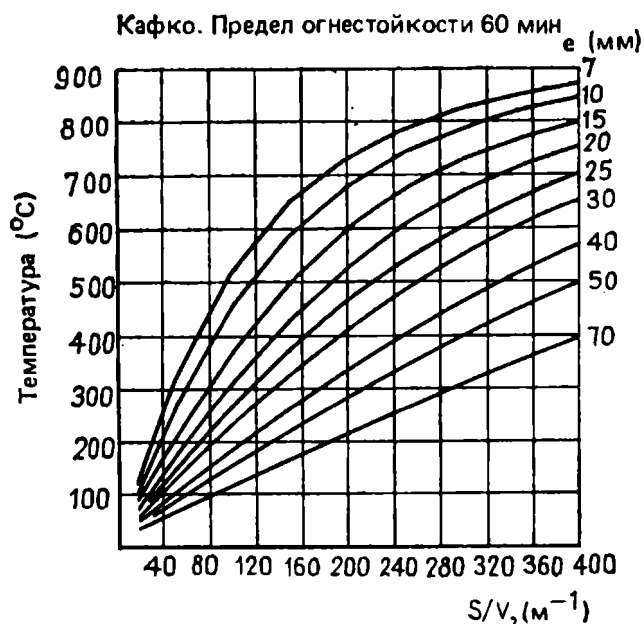
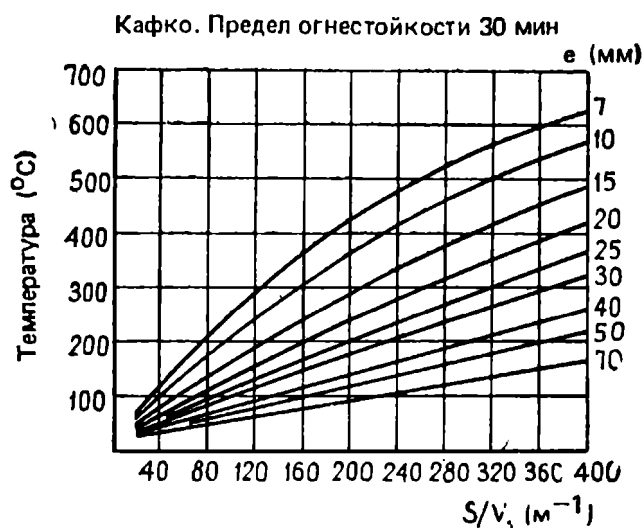
## Приложение I. СВЕДЕНИЯ О ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

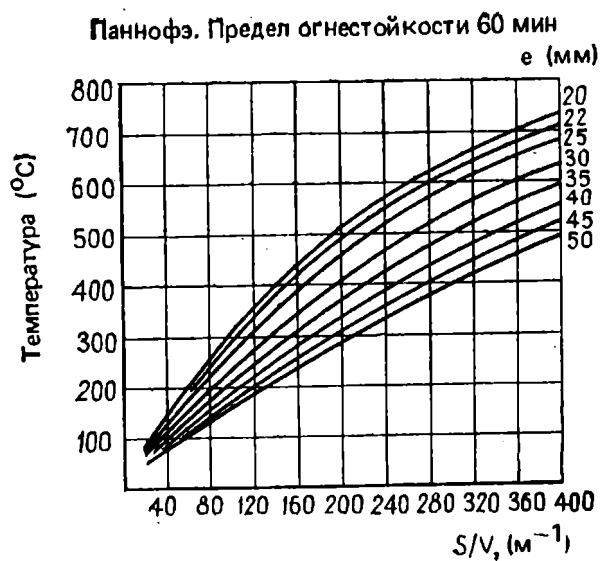
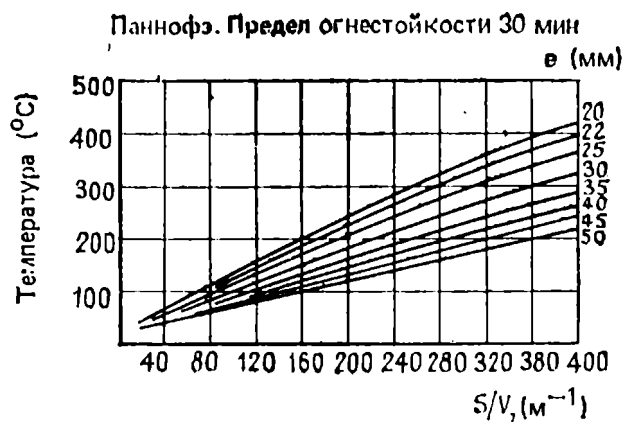
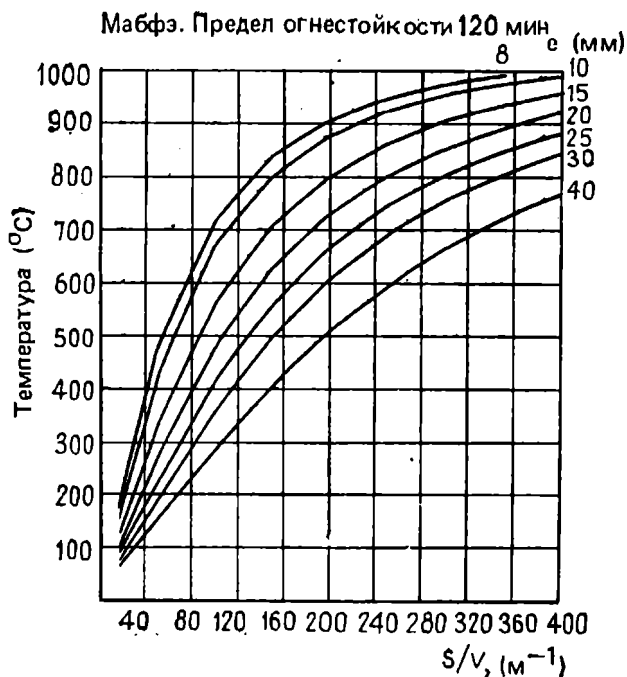
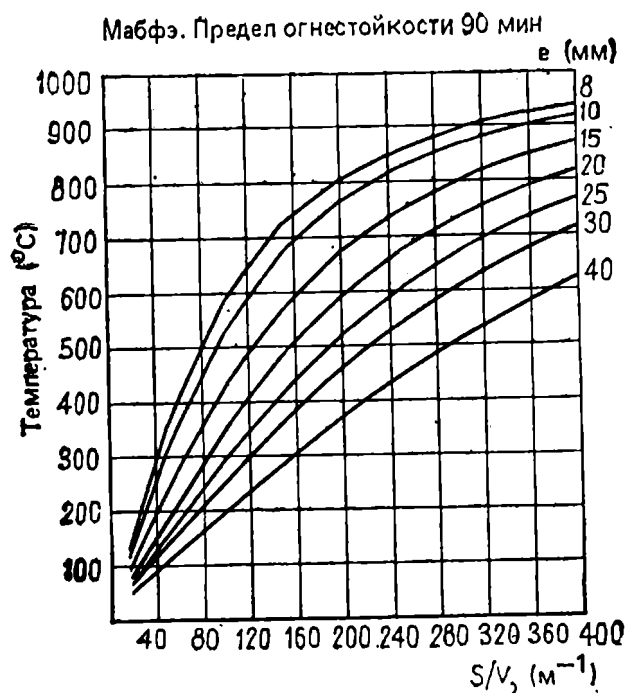
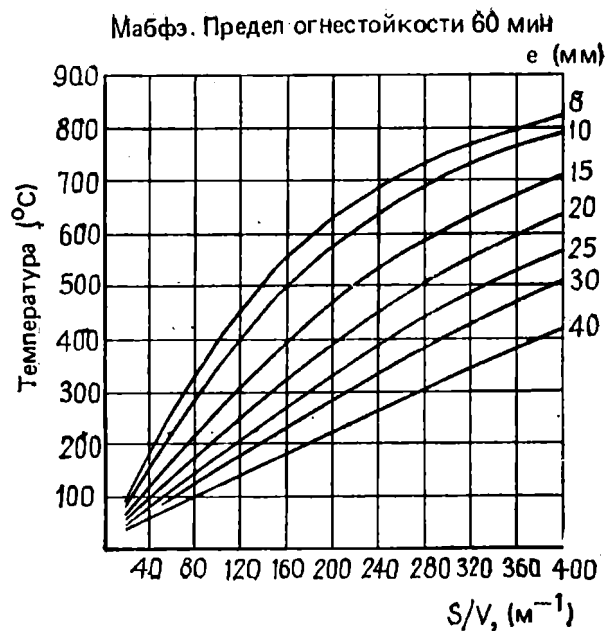
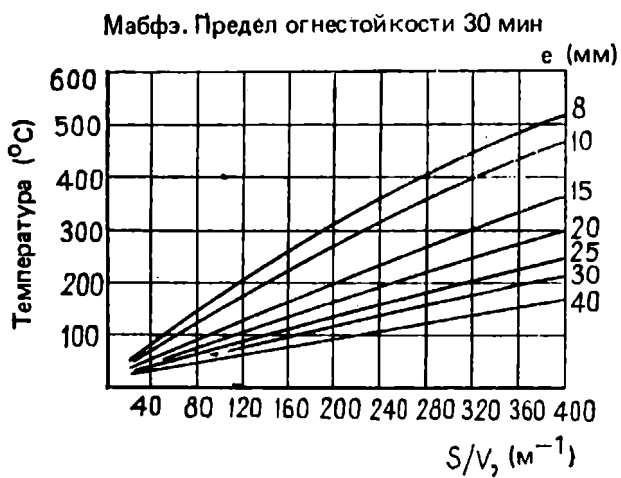
Ниже читатель найдет номограммы, уже упоминавшиеся в разд. 4.3.3, устанавливающие зависимость необходимой толщины защитного материала от требуемого предела огнестойкости, массивности профиля и критической температуры. В большинстве случаев эти номограммы получены путем обработки результатов экспериментальных исследований того или иного защитного материала. Однако в некоторых случаях эти испытания охватывают лишь небольшой диапазон толщин и характеристик массивности стальных профилей. Условная теплопроводность  $\gamma$ , которая служит основой этих номограмм, несколько изменяется в зависимости от толщины защитного материала и от массивности профиля (см. разд. 4.3.3.1). Поэтому эти номограммы нуждались бы в дополнительном обосновании и подтверждении, если бы из предосторожности выбранная кривая  $\gamma - \theta$  не была бы все время выше средней кривой. В результате этого получены номограммы, обеспечивающие достаточный запас огнестойкости, с единственной целью дать проектировщику практическое средство определения толщины защитного слоя. Очевидно, данные предлагаемых номограмм не должны заменять ни результатов испытаний, ни номограмм, построенных на более строгой основе и, в частности, полученных на основе экспериментальных данных по методу, одобренному Комитетом по исследованию и классификации строительных материалов и изделий с точки зрения пожарной опасности (СЕСМИ), созданным в соответствии с постановлением от 22 декабря 1949 г. («Журнал Оффисель» от 4 января 1950 г.).

При толщинах более 30 мм эти номограммы дают завышенные значения температур (примерно на 100—200 °С), достигаемых в стальных элементах за время, соответствующее пределу огнестойкости, превышающему 1 ч.

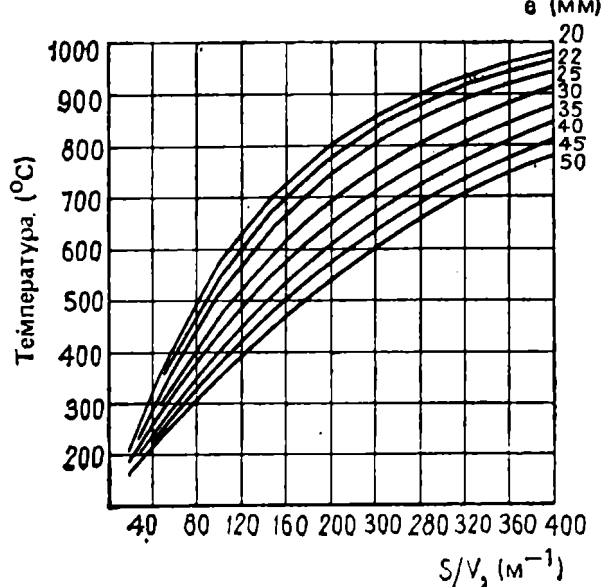
Ниже приведены защитные материалы и фирмы изготовители.

|                      |                                                                |
|----------------------|----------------------------------------------------------------|
| Кафко . . . . .      | А/О «Роксор» (Клиши)                                           |
| Мабфэ . . . . .      | «Самофер» (Юканж)                                              |
| Паннофэ . . . . .    | «Вермикулит э перлит»<br>(Нантерр)                             |
| Пикаль . . . . .     | Общество по изучению<br>фиброцемента и покрытий<br>ЭЛО (Париж) |
| Гистофибр . . . . .  | «Бландэн» (Роменвилль)                                         |
| Плакоплатр . . . . . | «Плакоплатр»<br>(Рюэй-Мальмезон)                               |
| Платр . . . . .      | Национальный синдикат<br>гипсовой промышленности<br>(Париж)    |
| Прогипсоль . . . . . | «Ламбер Эндюстри»<br>(Париж)                                   |
| Промабест . . . . .  | «Промат» (Париж)                                               |
| Пирок . . . . .      | А/О «Роксор» (Клиши)                                           |

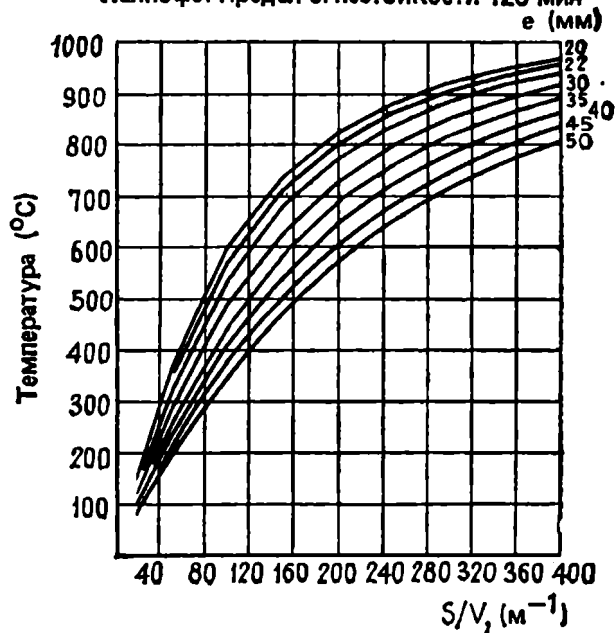




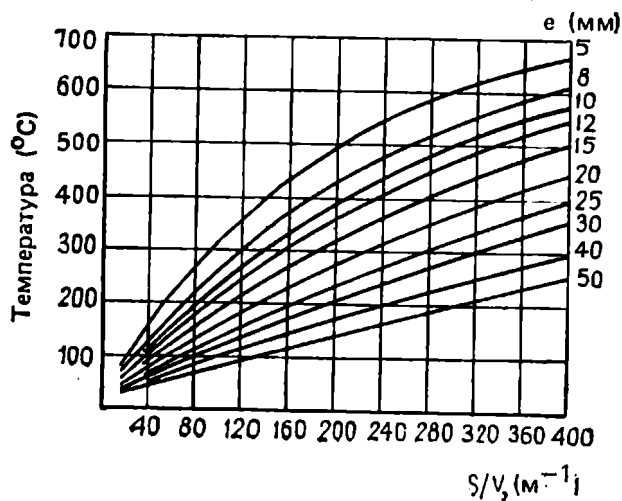
Паннофэ. Предел огнестойкости 90 мин



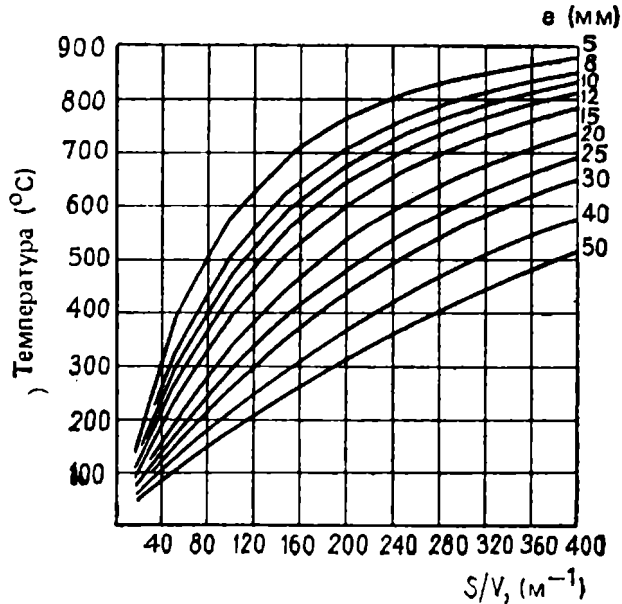
Паннофэ. Предел огнестойкости 120 мин



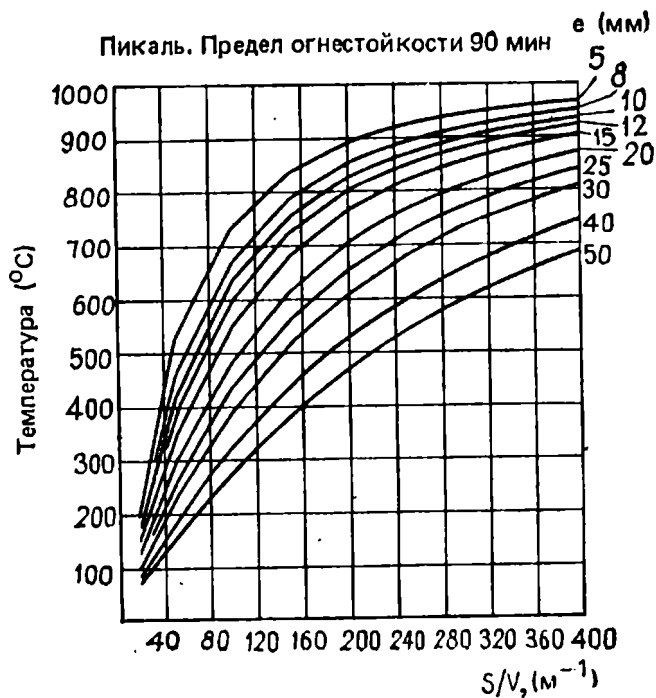
Пикаль. Предел огнестойкости 30 мин



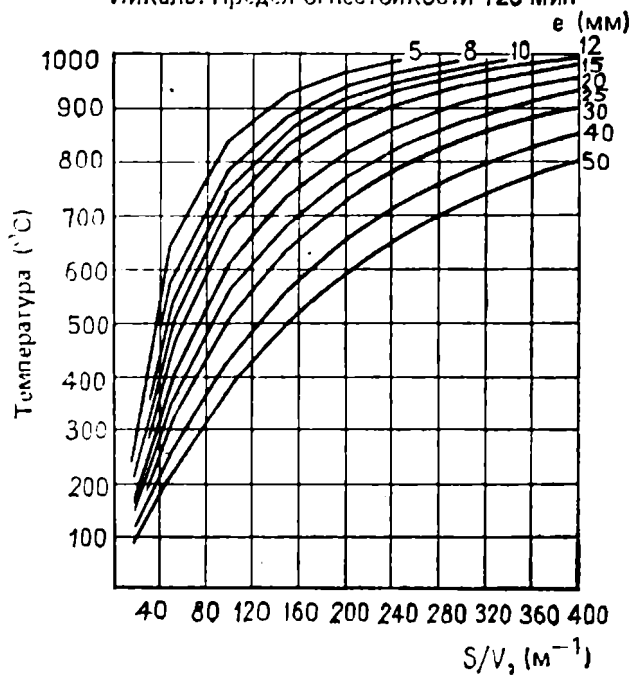
Пикаль. Предел огнестойкости 60 мин

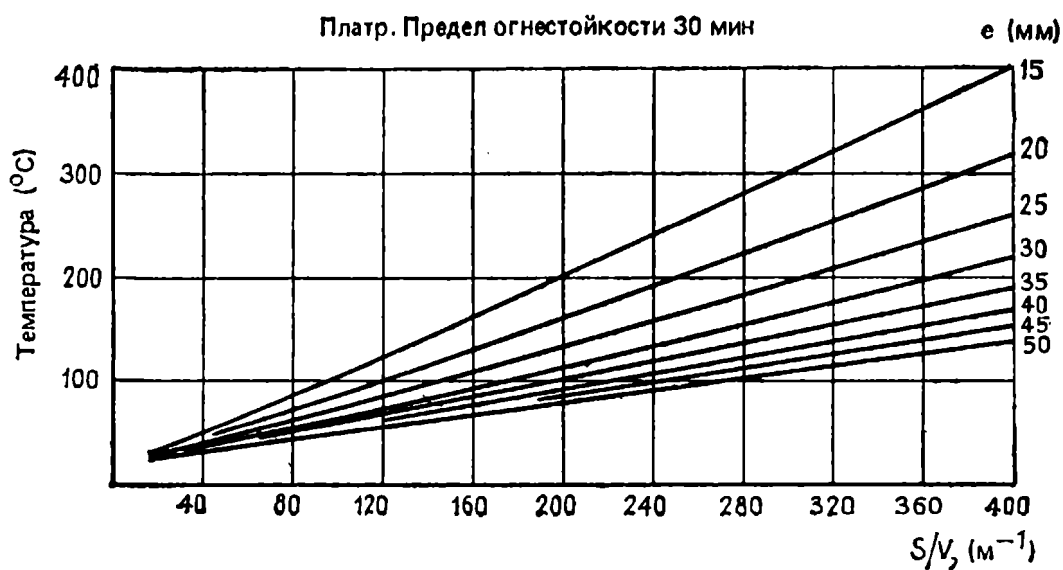
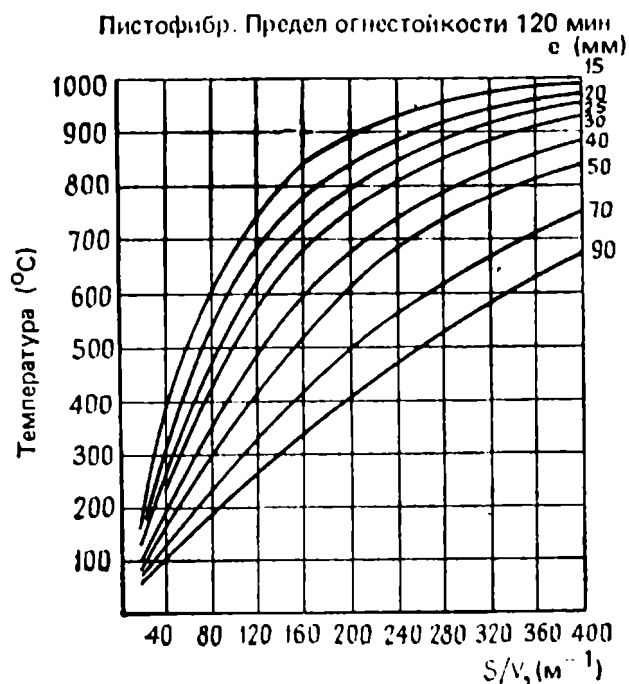
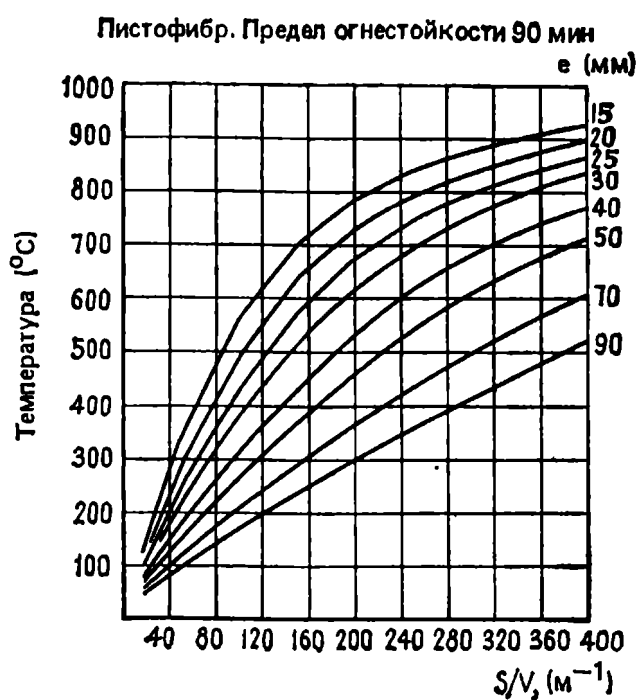
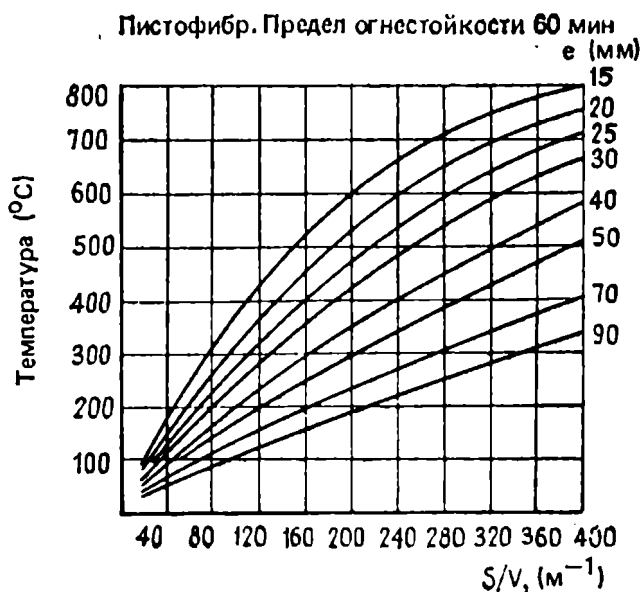


Пикаль. Предел огнестойкости 90 мин

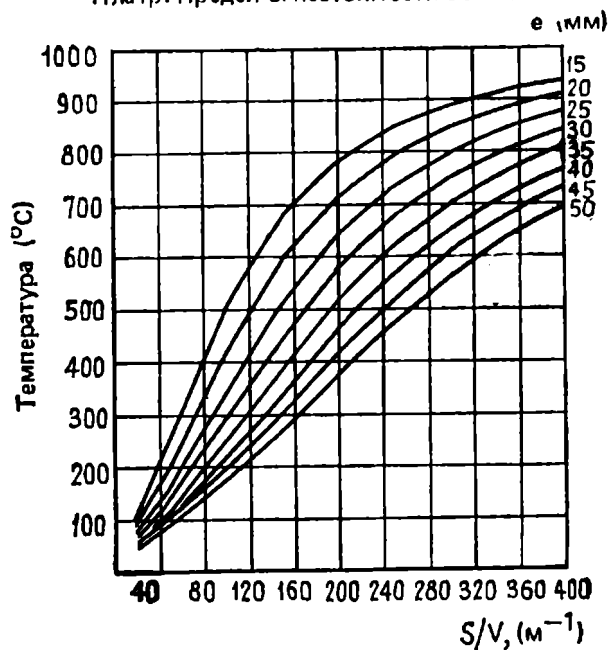


Пикаль. Предел огнестойкости 120 мин

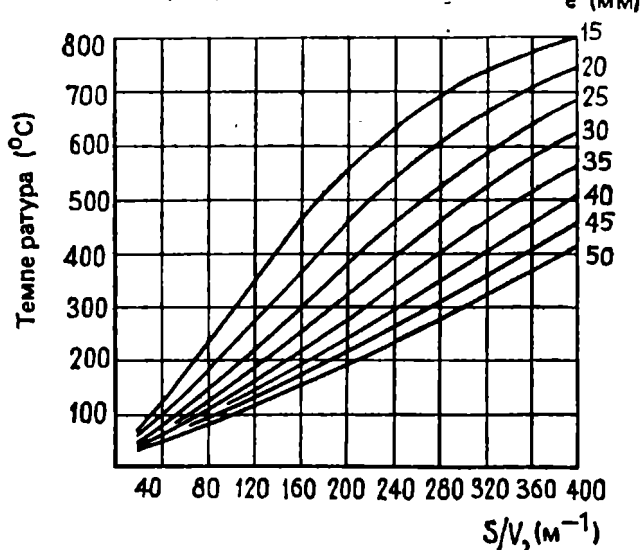




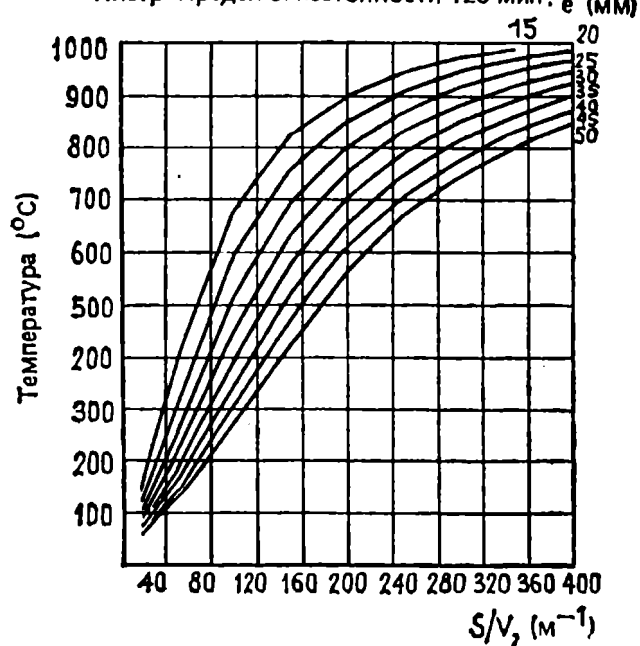
Платр. Предел огнестойкости 90 мин



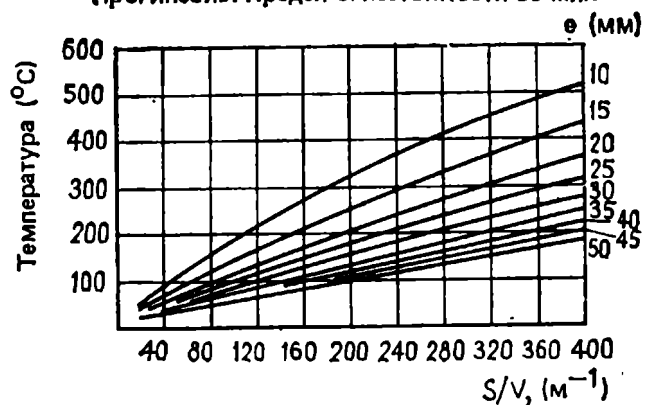
Платр. Предел огнестойкости 60 мин



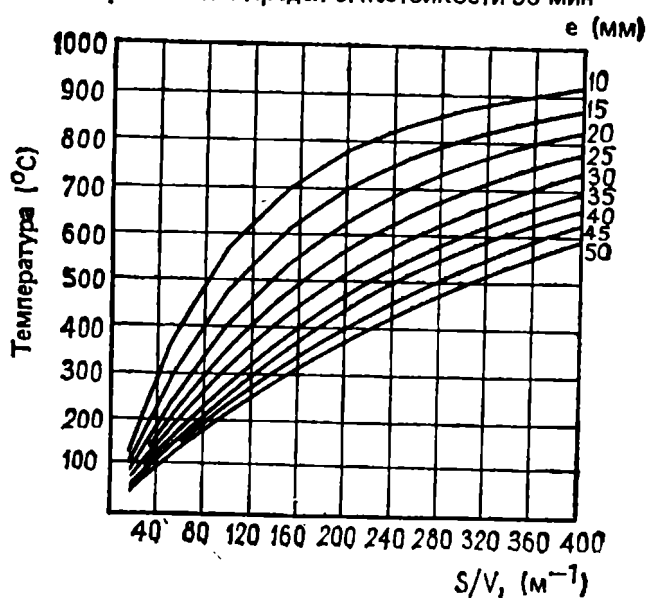
Платр. Предел огнестойкости 120 мин



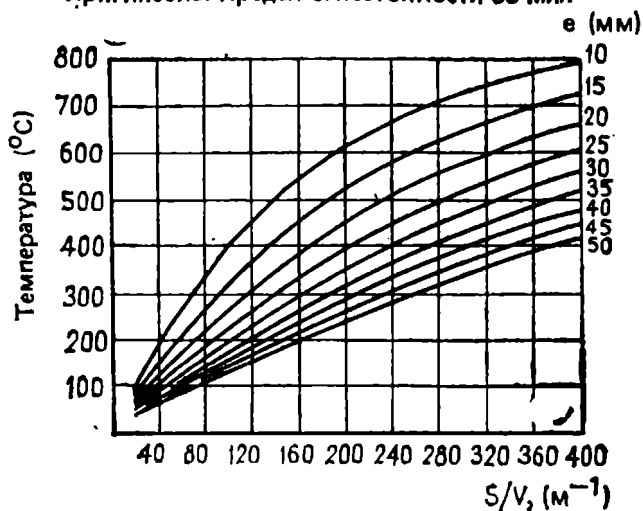
Прогипсоль. Предел огнестойкости 30 мин



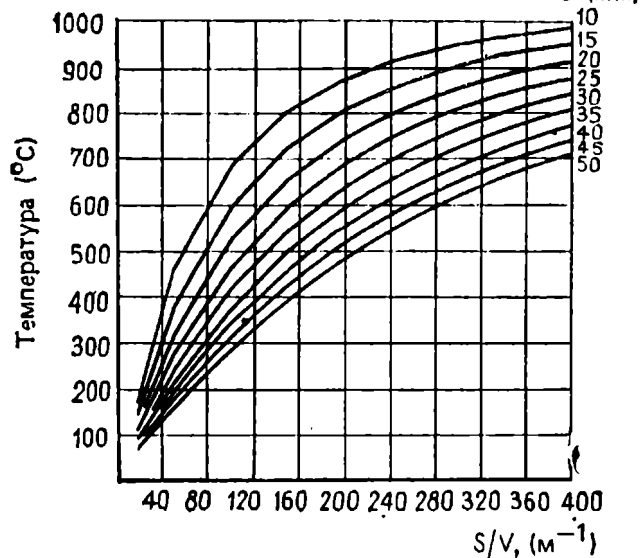
Прогипсоль. Предел огнестойкости 90 мин



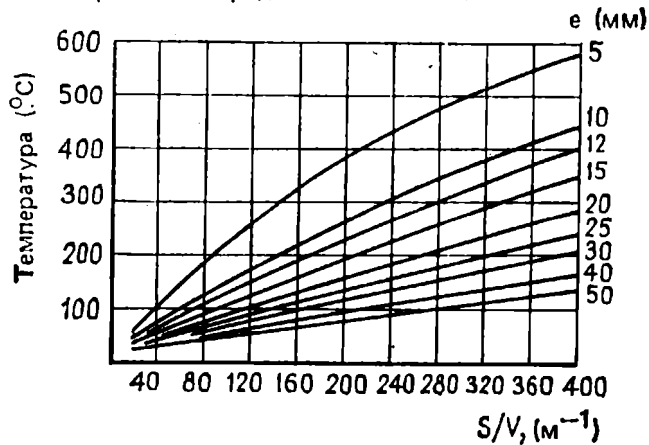
Прогипсоль. Предел огнестойкости 60 мин



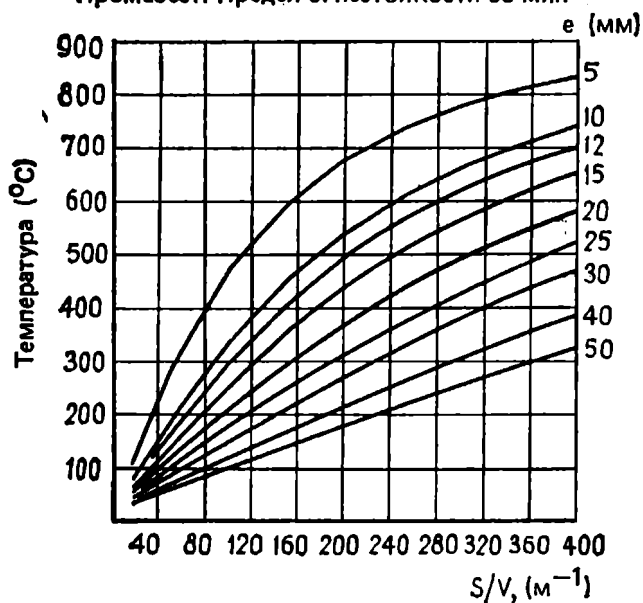
Прогипсоль. Предел огнестойкости 120 мин



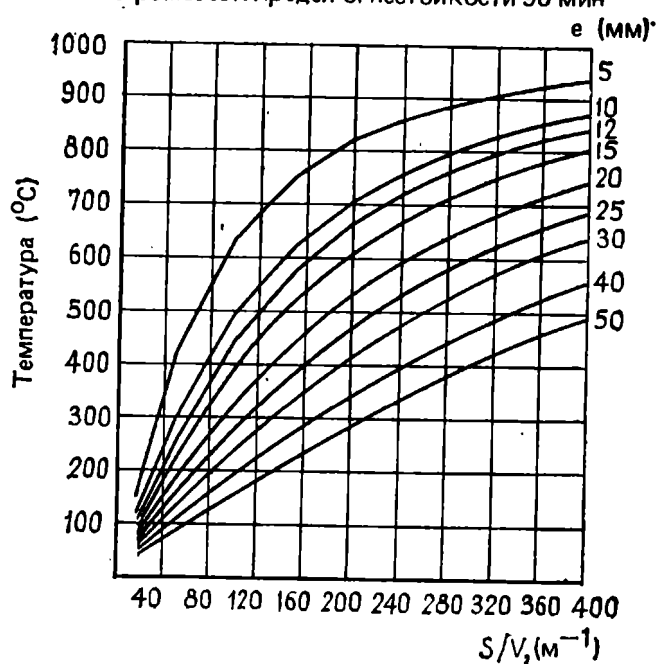
Промабест. Предел огнестойкости 30 мин



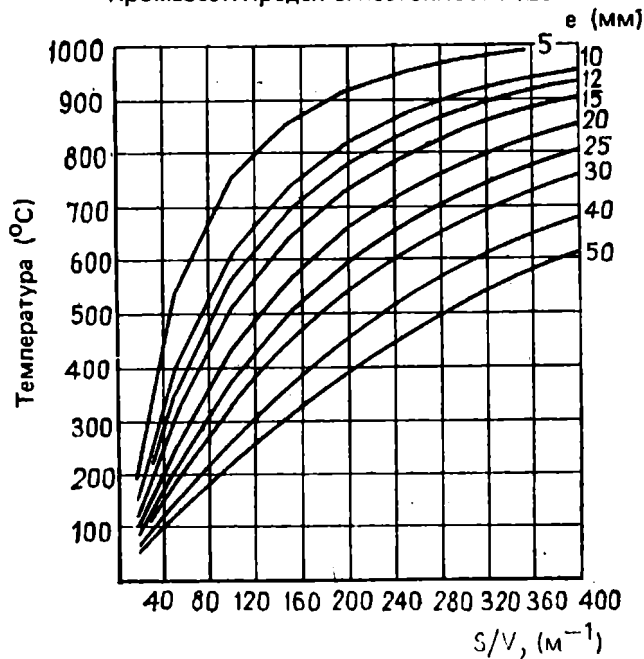
Промабест. Предел огнестойкости 60 мин

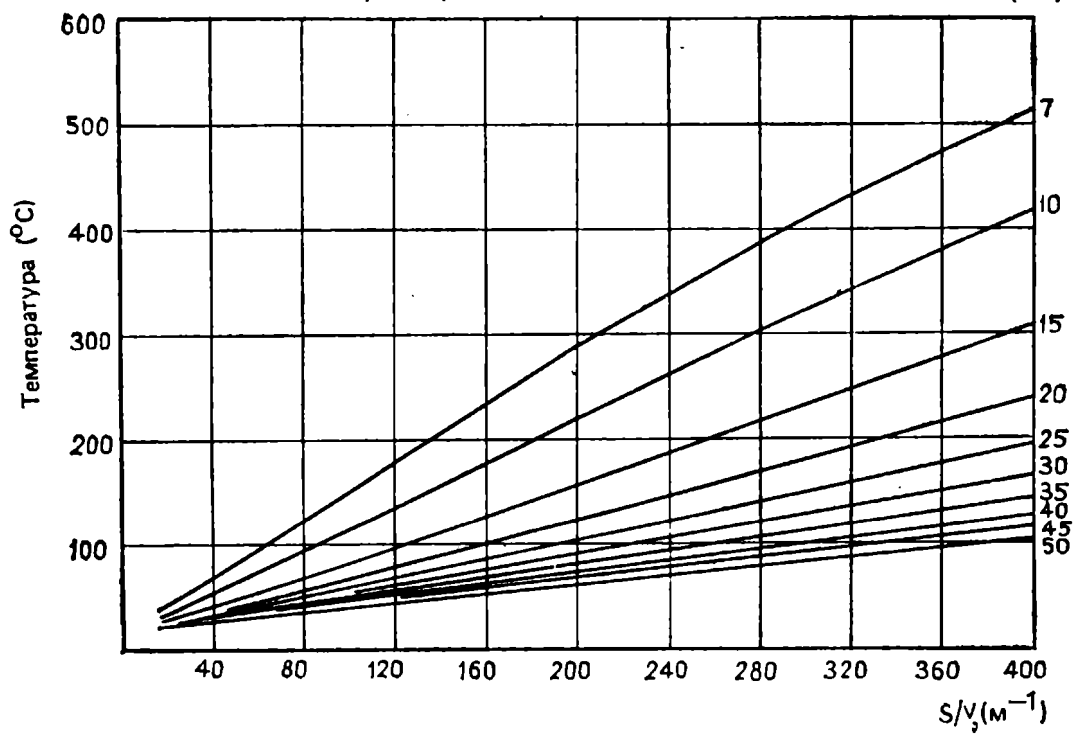


Промабест. Предел огнестойкости 90 мин

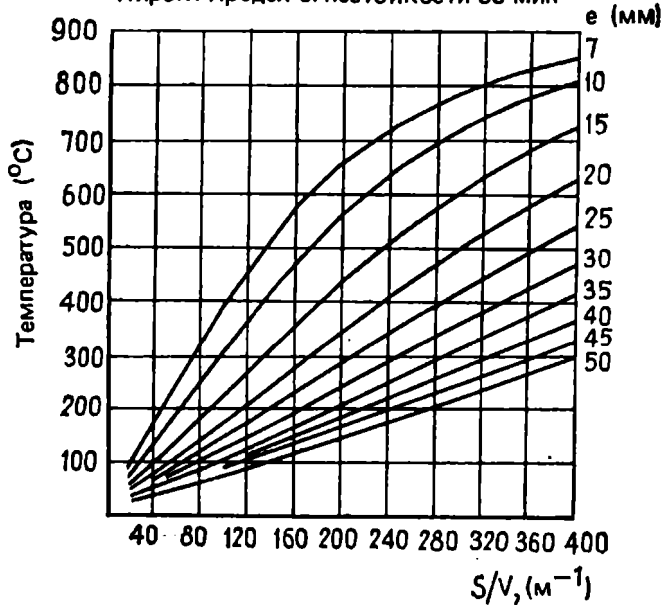


Промабест. Предел огнестойкости 120 мин

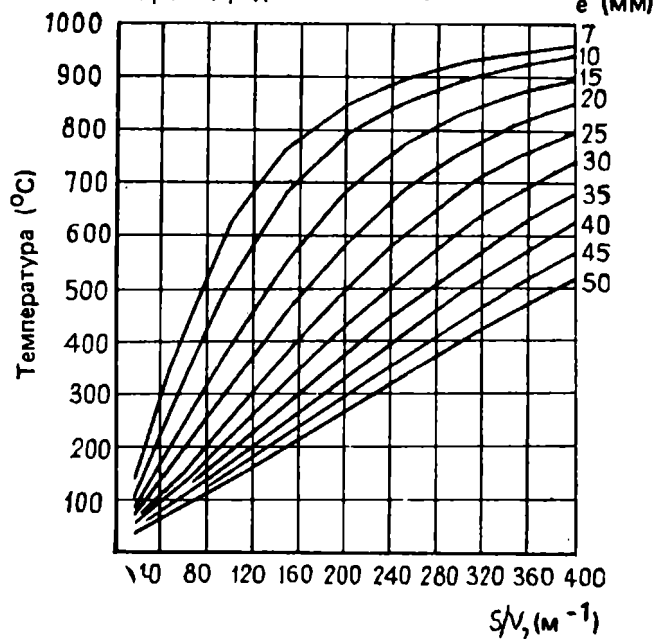




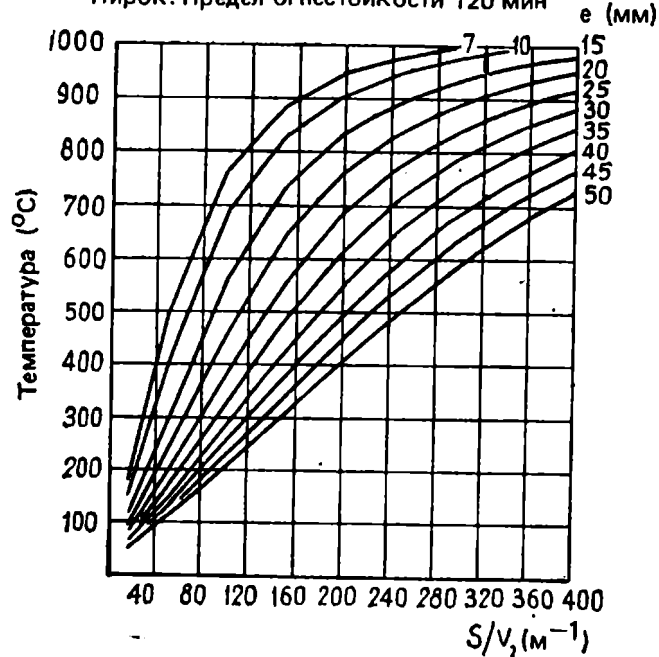
Пирок. Предел огнестойкости 60 мин



Пирок. Предел огнестойкости 90 мин



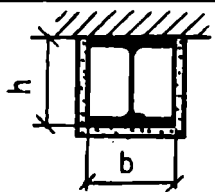
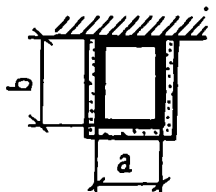
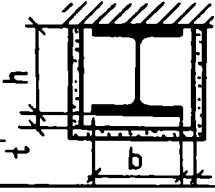
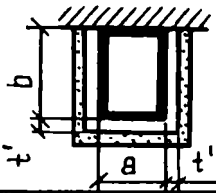
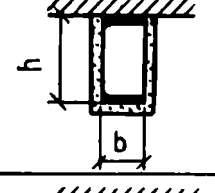
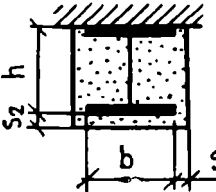
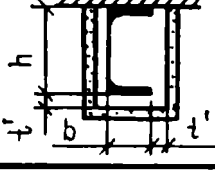
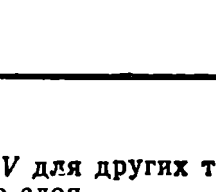
Пирок. Предел огнестойкости 120 мин



**Приложение II. КОЭФФИЦИЕНТЫ МАССИВНОСТИ. ИЗВЛЕЧЕНИЕ  
ИЗ ЕДИНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ДОКУМЕНТА  
(DTU) «МЕТОД РАСЧЕТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ПОВЕДЕНИЯ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
ПРИ ДЕЙСТВИИ ОГНЯ» [4.4]**

**I. Формулы для определения коэффициента массивности**

**Таблица I. РАЗЛИЧНЫЕ СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ЭЛЕМЕНТОВ  
(неравномерно нагретые элементы)**

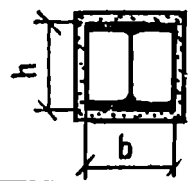
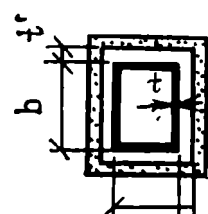
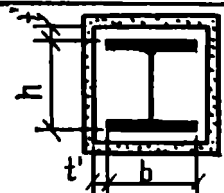
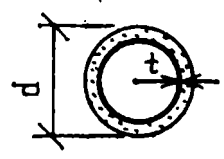
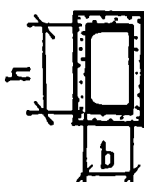
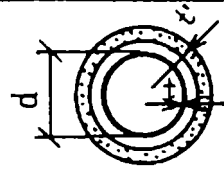
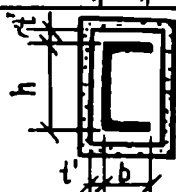
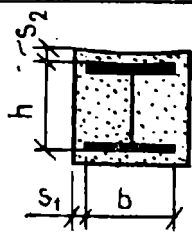
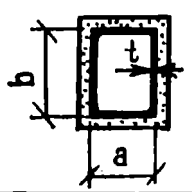
|                                                                                     | Значение<br>$S/V$ |                                                                                      | Значение<br>$S/V$         |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
|    | $\frac{2h+b}{A}$  |    | $\frac{a+b/2}{t(a+b-2t)}$ |
|   |                   |   |                           |
|  | $\frac{2h+b}{A}$  |  | $\frac{2h+b^*}{A}$        |
|  |                   |  |                           |

\* Это значение  $S/V$  не связано со значениями  $S/V$  для других типов защиты.  
Принимается скорректированная толщина защитного слоя

$$c'' = [(h + S_2) (b + 2S_1) - A] (2h + b).$$

Необходимо, чтобы  $S_2 \geq S_1$  и  $S \geq 1$  см

Таблица II. РАВНОМЕРНО НАГРЕВАЕМЫЕ ПО ПЕРИМЕТРУ ЭЛЕМЕНТЫ  
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ ИХ ЗАЩИТЫ

|                                                                                     | Значение<br>$S/V$       |                                                                                     | Значение<br>$S/V$     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
|    | $\frac{2(h+b)}{A}$      |   |                       |
|    |                         |   |                       |
|    | $\frac{2(h+b)}{A}$      |   | $\frac{t}{t(d-t)}$    |
|   |                         |  |                       |
|  | $\frac{a+b}{t(a+b-2t)}$ |                                                                                     | $2 \frac{(b+h)^*}{A}$ |

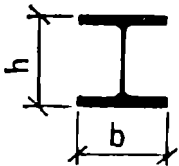
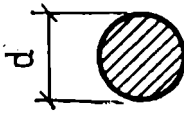
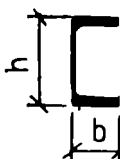
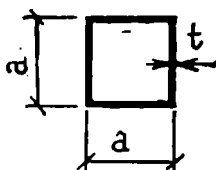
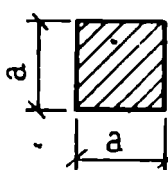
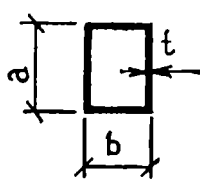
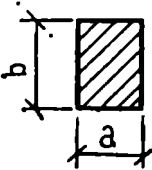
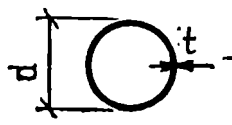
- Это значение  $S/V$  не связано со значениями  $S/V$  для других типов защиты.  
Принимается скорректированная толщина защитного слоя

$$e' = [(h + 2S_2)(b + 2S_1) - A] 2(b + h).$$

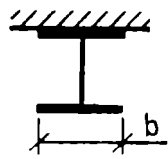
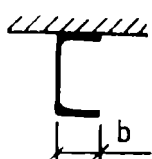
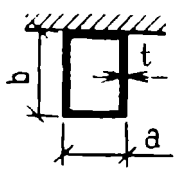
Необходимо, чтобы  $S_1 \geq S_2$  и  $S_2 \geq 1$  см.

Значение  $S/V$  для верхнего рисунка в правой колонке  $\frac{a+b}{t[a+b-2t]}$

**Таблица III. ЭЛЕМЕНТЫ, РАВНОМЕРНО НАГРЕВАЕМЫЕ ПО ПЕРИМЕТРУ СЕЧЕНИЯ (НЕЗАЩИЩЕННЫЕ ИЛИ РАВНОМЕРНО ЗАЩИЩЕННЫЕ ПО ПЕРИМЕТРУ)**

|                                                                                    | Значение<br>$S/V$    |                                                                                    | Значение<br>$S/V$       |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|
|   | $\frac{P}{A}$        |  | $\frac{4}{d}$           |
|   | $\frac{P}{A}$        |  | $\frac{a}{t(a-t)}$      |
|   | $\frac{4}{a}$        |  | $\frac{a+b}{t(a+b-2t)}$ |
|  | $\frac{2(a+b)}{a-b}$ |  | $\frac{d}{t(d-t)}$      |

**Таблица IV. НЕЗАЩИЩЕННЫЕ ИЛИ ЗАЩИЩЕННЫЕ ПО ПЕРИМЕТРУ СЕЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТЫ (неравномерно нагреваемые)**

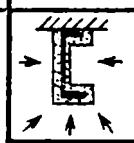
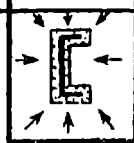
|                                                                                     | Значение<br>$S/V$         |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
|  | $\frac{P-b}{A}$           |
|  | $\frac{P-b}{A}$           |
|  | $\frac{a+b/2}{t(a+b-2t)}$ |

Обозначения:  $P$  — периметр двутавра или швеллера;  $A$  — площадь сечения двутавра или швеллера.

2. Некоторые таблицы значений коэффициента массивности (коэффициент массивности выражается в  $m^{-1}$ )

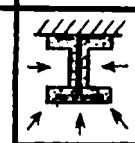
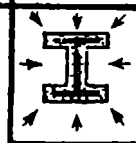
Профили UAP

| Профили UAP |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 80          | 308,4 | 233,6 | 266,4 | 191,6 |
| 100         | 290,3 | 223,9 | 253,0 | 186,6 |
| 130         | 267,4 | 211,4 | 236,0 | 180,0 |
| 150         | 238,4 | 187,8 | 210,0 | 159,4 |
| 175         | 227,8 | 181,5 | 201,9 | 155,6 |
| 200         | 213,7 | 171,9 | 190,3 | 148,4 |
| 220         | 205,0 | 165,3 | 182,9 | 143,3 |
| 250         | 187,7 | 153,0 | 168,3 | 133,6 |
| 270         | 180,0 | 145,7 | 161,1 | 126,7 |
| 300         | 167,4 | 136,5 | 150,3 | 119,5 |



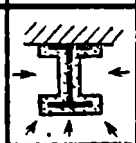
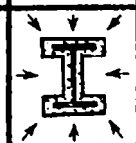
Профили НЕВ

| Профили НЕВ |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 100         | 218,1 | 153,8 | 179,6 | 115,4 |
| 120         | 201,8 | 141,2 | 166,5 | 105,9 |
| 140         | 187,2 | 130,2 | 154,7 | 97,7  |
| 160         | 169,1 | 117,9 | 139,6 | 88,4  |
| 180         | 157,7 | 110,3 | 130,2 | 82,7  |
| 200         | 147,2 | 102,4 | 121,6 | 76,8  |
| 220         | 139,6 | 96,7  | 115,4 | 72,5  |
| 240         | 130,2 | 90,6  | 107,5 | 67,9  |
| 260         | 126,7 | 87,8  | 104,7 | 65,9  |
| 280         | 123,3 | 85,2  | 102,0 | 63,9  |
| 300         | 116,0 | 80,5  | 95,9  | 60,4  |
| 320         | 109,7 | 76,9  | 91,1  | 58,3  |
| 340         | 105,9 | 74,9  | 88,4  | 57,3  |
| 360         | 102,4 | 73,1  | 85,8  | 56,5  |
| 400         | 97,6  | 70,8  | 82,4  | 55,6  |
| 450         | 91,3  | 68,8  | 77,5  | 55,0  |
| 500         | 88,9  | 67,1  | 76,3  | 54,5  |
| 550         | 87,4  | 66,9  | 75,6  | 55,1  |
| 600         | 85,9  | 66,7  | 74,8  | 55,6  |



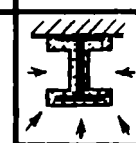
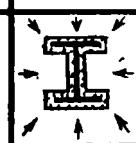
Профили IPE

| Профили IPE |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 80          | 430,6 | 329,8 | 370,4 | 269,6 |
| 100         | 389,3 | 301,0 | 335,9 | 247,6 |
| 120         | 359,1 | 278,8 | 310,6 | 230,3 |
| 140         | 335,4 | 259,8 | 290,9 | 215,2 |
| 160         | 309,5 | 240,8 | 268,7 | 200,0 |
| 180         | 292,1 | 226,8 | 254,0 | 188,7 |
| 200         | 269,5 | 210,5 | 234,4 | 175,4 |
| 220         | 253,9 | 197,6 | 221,0 | 164,7 |
| 240         | 235,5 | 184,1 | 204,9 | 153,5 |
| 270         | 226,6 | 176,5 | 197,2 | 147,1 |
| 300         | 215,6 | 167,3 | 187,7 | 139,4 |
| 330         | 199,7 | 156,5 | 174,1 | 131,0 |
| 360         | 185,7 | 145,8 | 162,3 | 122,4 |
| 400         | 174,0 | 137,3 | 152,7 | 116,0 |
| 450         | 163,0 | 129,6 | 143,7 | 110,3 |
| 500         | 150,0 | 120,7 | 132,8 | 103,4 |
| 550         | 140,3 | 113,4 | 124,6 | 97,8  |
| 600         | 129,5 | 105,1 | 115,4 | 91,0  |

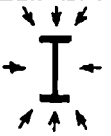
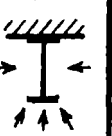
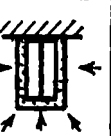


Профили HEA

| Профили HEA |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 100         | 265,1 | 184,9 | 217,9 | 137,7 |
| 120         | 267,6 | 185,0 | 220,2 | 137,5 |
| 140         | 252,9 | 173,9 | 208,3 | 129,3 |
| 160         | 230,9 | 160,8 | 189,7 | 119,6 |
| 180         | 225,2 | 155,0 | 185,4 | 115,2 |
| 200         | 211,9 | 145,0 | 174,7 | 107,8 |
| 220         | 196,0 | 133,7 | 161,7 | 99,5  |
| 240         | 178,4 | 122,4 | 147,1 | 91,1  |
| 260         | 170,5 | 117,5 | 140,6 | 87,6  |
| 280         | 164,4 | 113,1 | 135,7 | 84,3  |
| 300         | 152,9 | 104,9 | 126,2 | 78,2  |
| 320         | 141,5 | 98,1  | 117,4 | 74,0  |
| 340         | 134,1 | 94,4  | 111,6 | 71,9  |
| 360         | 128,2 | 91,0  | 107,1 | 70,0  |
| 400         | 120,1 | 86,8  | 101,3 | 67,9  |
| 450         | 112,9 | 83,1  | 96,1  | 66,3  |
| 500         | 106,8 | 80,0  | 91,6  | 64,8  |
| 550         | 104,3 | 79,3  | 90,2  | 65,2  |
| 600         | 102,0 | 78,6  | 88,7  | 65,3  |

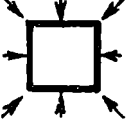
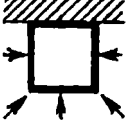


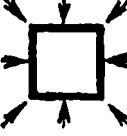
# Профили НЕМ

| Профили<br>НЕМ |  |  |  |  |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 100            | 116,4                                                                             | 85,0                                                                              | 96,4                                                                              | 65,0                                                                              |
| 120            | 111,1                                                                             | 80,1                                                                              | 92,2                                                                              | 61,1                                                                              |
| 140            | 103,6                                                                             | 75,9                                                                              | 85,5                                                                              | 57,8                                                                              |
| 160            | 99,9                                                                              | 71,3                                                                              | 82,8                                                                              | 54,2                                                                              |
| 180            | 96,2                                                                              | 68,1                                                                              | 79,8                                                                              | 51,7                                                                              |
| 200            | 91,4                                                                              | 64,9                                                                              | 76,7                                                                              | 49,2                                                                              |
| 220            | 88,4                                                                              | 62,4                                                                              | 73,2                                                                              | 47,3                                                                              |
| 240            | 73,1                                                                              | 51,9                                                                              | 60,7                                                                              | 39,5                                                                              |
| 260            | 71,5                                                                              | 50,8                                                                              | 59,3                                                                              | 38,6                                                                              |
| 280            | 70,4                                                                              | 49,8                                                                              | 58,4                                                                              | 37,8                                                                              |
| 300            | 60,4                                                                              | 42,9                                                                              | 50,1                                                                              | 32,7                                                                              |
| 320            | 59,9                                                                              | 42,8                                                                              | 50,0                                                                              | 32,9                                                                              |
| 340            | 60,2                                                                              | 43,4                                                                              | 50,4                                                                              | 33,7                                                                              |
| 360            | 60,5                                                                              | 44,1                                                                              | 50,9                                                                              | 34,4                                                                              |
| 400            | 61,4                                                                              | 45,4                                                                              | 52,0                                                                              | 35,9                                                                              |
| 450            | 62,6                                                                              | 46,8                                                                              | 53,5                                                                              | 37,7                                                                              |
| 500            | 63,3                                                                              | 48,2                                                                              | 54,4                                                                              | 39,3                                                                              |
| 550            | 64,3                                                                              | 49,5                                                                              | 55,7                                                                              | 40,9                                                                              |
| 600            | 65,2                                                                              | 50,9                                                                              | 56,8                                                                              | 42,5                                                                              |
|                |  |                                                                                   |  |                                                                                   |

# Круглые трубчатые профили

| Круглые<br>трубы |          |  | Круглые<br>трубы |          |  |
|------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Д,<br>мм         | е,<br>мм |                                                                                     | Д,<br>мм         | е,<br>мм |                                                                                     |
| 21,3             | 2,3      | 487,4                                                                               | 114,3            | 3,6      | 266,8                                                                               |
|                  |          |                                                                                     |                  | 5,4      | 209,1                                                                               |
| 26,9             | 2,3      | 475,3                                                                               |                  | 6,3      | 168,0                                                                               |
|                  | 3,2      | 354,6                                                                               | 139,7            | 4,0      | 257,4                                                                               |
|                  |          |                                                                                     |                  | 5,0      | 207,4                                                                               |
| 33,7             | 2,6      | 416,8                                                                               |                  | 6,3      | 166,2                                                                               |
|                  | 3,2      | 345,3                                                                               | 168,3            | 3,6      | 283,8                                                                               |
|                  | 4,0      | 283,7                                                                               |                  | 4,5      | 228,3                                                                               |
| 42,4             | 2,6      | 409,7                                                                               |                  | 5,4      | 191,3                                                                               |
|                  | 3,2      | 338,0                                                                               |                  | 6,3      | 164,9                                                                               |
|                  | 4,0      | 276,1                                                                               |                  | 7,1      | 147,0                                                                               |
| 48,3             | 2,9      | 366,9                                                                               |                  | 8,0      | 131,2                                                                               |
|                  | 3,2      | 334,7                                                                               | 193,7            | 3,6      | 299,0                                                                               |
|                  | 4,0      | 272,6                                                                               |                  | 6,3      | 164,1                                                                               |
| 60,3             | 2,9      | 362,2                                                                               |                  | 8,0      | 130,4                                                                               |
|                  | 3,2      | 330,0                                                                               | 219,1            | 3,6      | 282,4                                                                               |
|                  | 4,0      | 267,3                                                                               |                  | 6,3      | 163,4                                                                               |
|                  | 5,0      | 218,1                                                                               |                  | 8,0      | 129,7                                                                               |
| 76,1             | 2,9      | 358,5                                                                               | 273,0            | 3,6      | 281,5                                                                               |
|                  | 3,6      | 291,3                                                                               |                  | 6,3      | 162,5                                                                               |
|                  | 4,0      | 263,9                                                                               |                  | 8,0      | 128,8                                                                               |
|                  | 5,0      | 214,0                                                                               | 323,9            | 4,5      | 253,1                                                                               |
| 88,9             | 3,2      | 324,1                                                                               |                  | 6,3      | 161,9                                                                               |
|                  | 4,0      | 261,3                                                                               |                  | 8,0      | 127,9                                                                               |
|                  | 5,4      | 197,1                                                                               |                  | 10,0     | 103,2                                                                               |
| 101,6            | 3,6      | 269,1                                                                               | 406,4            | 4,5      | 224,7                                                                               |
|                  | 5,0      | 210,4                                                                               |                  | 6,3      | 161,2                                                                               |
|                  | 6,3      | 169,2                                                                               |                  | 10,0     | 102,5                                                                               |

| Квадратный профиль |         |  |  |
|--------------------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| С<br>мм            | е<br>мм |                                                                                   |                                                                                   |
| 135                | 3,2     | 316,8                                                                             | 236,7                                                                             |
|                    | 5,0     | 204,4                                                                             | 152,5                                                                             |
|                    | 7,1     | 145,3                                                                             | 108,1                                                                             |
| 140                | 3,6     | 283,9                                                                             | 207,9                                                                             |
|                    | 4,5     | 228,2                                                                             | 169,3                                                                             |
|                    | 6,3     | 165,1                                                                             | 120,5                                                                             |
|                    | 8,0     | 131,4                                                                             | 95,5                                                                              |
|                    | 10,0    | 106,4                                                                             | 78,1                                                                              |
| 150                | 4,0     | 255,6                                                                             | 190,0                                                                             |
|                    | 5,0     | 205,6                                                                             | 152,5                                                                             |
|                    | 6,0     | 172,3                                                                             | 127,5                                                                             |
|                    | 8,0     | 130,8                                                                             | 96,3                                                                              |
|                    | 10,0    | 105,9                                                                             | 77,5                                                                              |
| 160                | 3,6     | 283,1                                                                             | 207,9                                                                             |
|                    | 6,3     | 164,1                                                                             | 120,3                                                                             |
|                    | 8,0     | 130,4                                                                             | 96,0                                                                              |
|                    | 10,0    | 105,5                                                                             | 77,7                                                                              |
| 180                | 3,6     | 282,4                                                                             | 208,3                                                                             |
|                    | 6,3     | 163,5                                                                             | 120,1                                                                             |
|                    | 8,0     | 129,8                                                                             | 95,1                                                                              |
|                    | 10,0    | 104,8                                                                             | 77,3                                                                              |
| 200                | 5,0     | 204,1                                                                             | 151,8                                                                             |
|                    | 6,0     | 170,8                                                                             | 126,8                                                                             |
|                    | 8,0     | 129,2                                                                             | 95,6                                                                              |
|                    | 10,0    | 104,3                                                                             | 76,9                                                                              |
| 220                | 6,3     | 162,5                                                                             | 120,3                                                                             |
|                    | 8,0     | 128,8                                                                             | 95,2                                                                              |
| 250                | 6,0     | 170,0                                                                             | 126,4                                                                             |
|                    | 8,0     | 128,4                                                                             | 95,2                                                                              |
|                    | 10,0    | 103,4                                                                             | 76,5                                                                              |
|                    | 12,0    | 86,7                                                                              | 64,0                                                                              |
| 260                | 6,3     | 162,0                                                                             | 120,1                                                                             |
|                    | 8,0     | 128,2                                                                             | 95,0                                                                              |
|                    | 10,0    | 103,2                                                                             | 76,3                                                                              |
| 300                | 7,0     | 145,6                                                                             | 108,4                                                                             |
|                    | 8,0     | 127,7                                                                             | 94,9                                                                              |
|                    | 10,0    | 102,8                                                                             | 76,2                                                                              |
|                    | 12,0    | 86,1                                                                              | 63,7                                                                              |
| 325                | 6,3     | 161,2                                                                             | 119,8                                                                             |
|                    | 10,0    | 102,6                                                                             | 76,1                                                                              |
| 370                | 6,3     | 161,0                                                                             | 119,2                                                                             |
|                    | 8,0     | 127,3                                                                             | 94,1                                                                              |
|                    | 9,5     | 107,5                                                                             | 79,5                                                                              |

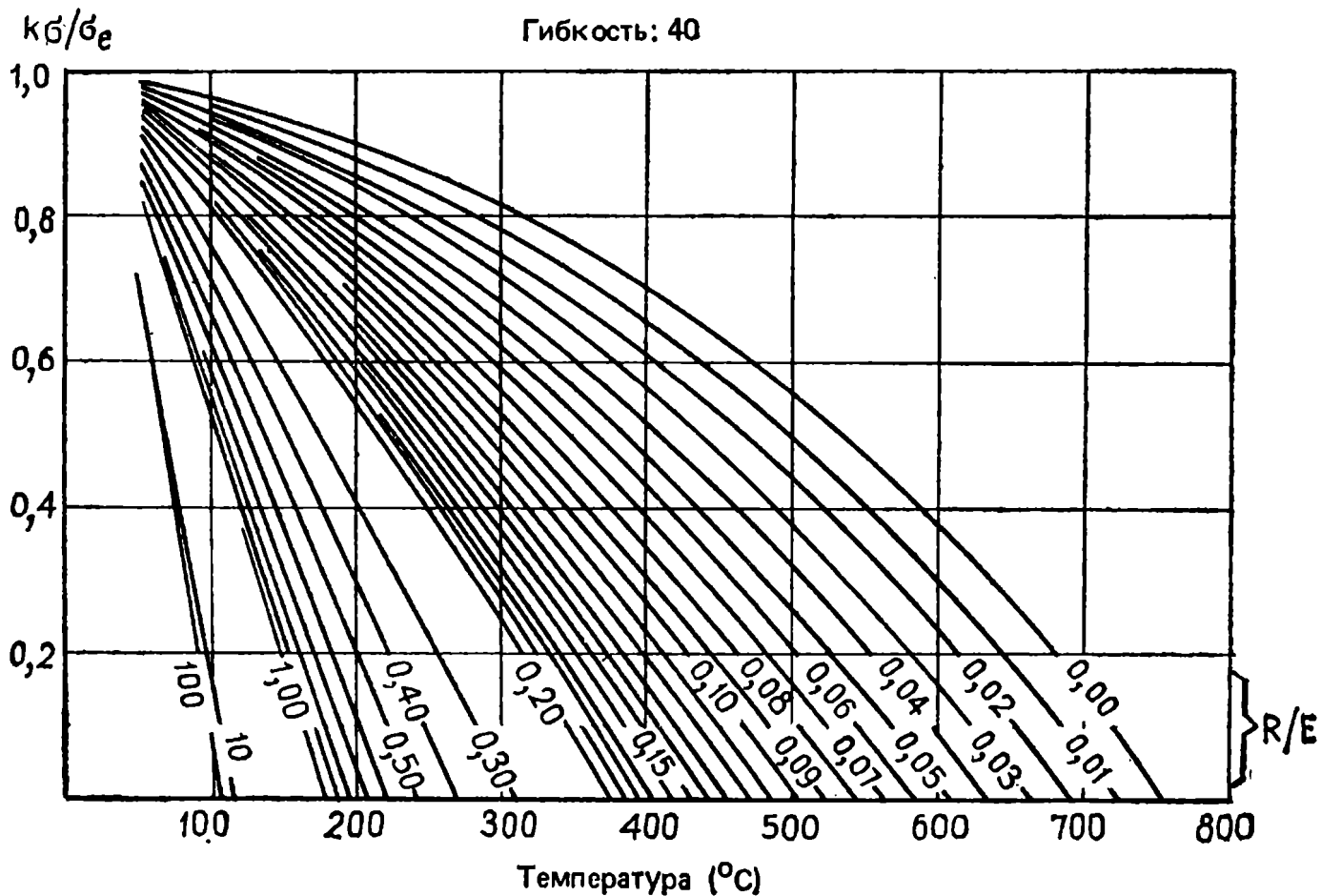
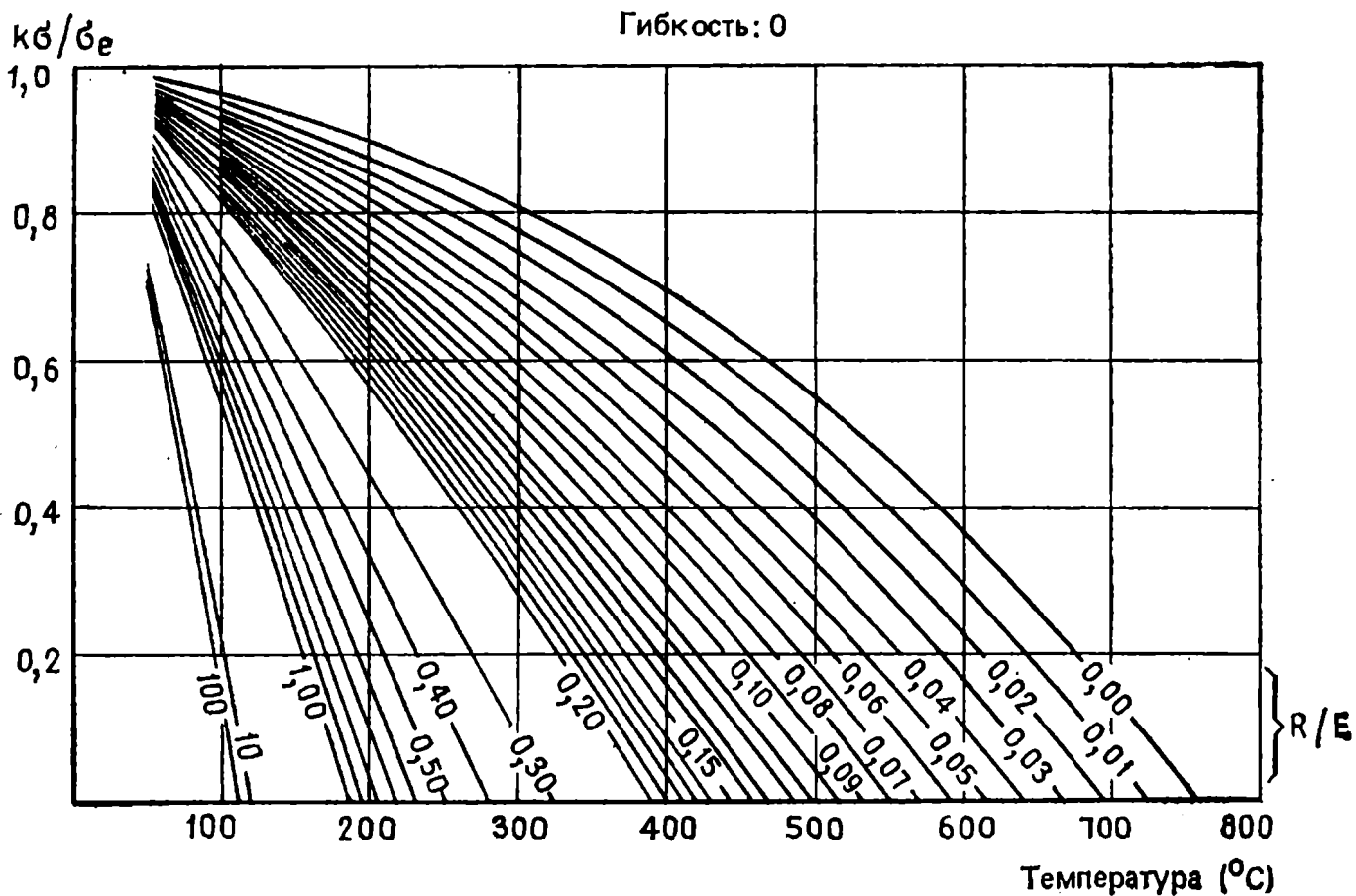
| Квадратный профиль |         |  |  |
|--------------------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| С<br>мм            | е<br>мм |                                                                                     |                                                                                     |
| 22                 | 2,3     | 464,0                                                                               | 342,6                                                                               |
| 28                 | 2,6     | 407,1                                                                               | 301,1                                                                               |
|                    | 3,2     | 335,6                                                                               | 247,3                                                                               |
|                    | 4,0     | 273,8                                                                               | 200,9                                                                               |
| 35                 | 2,7     | 388,0                                                                               | 287,7                                                                               |
|                    | 3,2     | 330,5                                                                               | 244,5                                                                               |
|                    | 4,0     | 268,4                                                                               | 197,9                                                                               |
| 40                 | 2,7     | 385,7                                                                               | 286,4                                                                               |
|                    | 3,2     | 328,0                                                                               | 243,1                                                                               |
|                    | 4,0     | 265,9                                                                               | 196,5                                                                               |
| 45                 | 2,7     | 383,9                                                                               | 285,4                                                                               |
|                    | 3,2     | 326,2                                                                               | 242,1                                                                               |
|                    | 4,0     | 263,9                                                                               | 195,3                                                                               |
| 50                 | 3,2     | 324,7                                                                               | 241,2                                                                               |
|                    | 4,0     | 262,4                                                                               | 194,5                                                                               |
|                    | 5,0     | 212,7                                                                               | 157,1                                                                               |
| 60                 | 3,2     | 322,6                                                                               | 240,0                                                                               |
|                    | 4,0     | 260,2                                                                               | 193,3                                                                               |
|                    | 5,0     | 210,4                                                                               | 155,8                                                                               |
| 70                 | 3,2     | 321,1                                                                               | 239,2                                                                               |
|                    | 4,0     | 258,7                                                                               | 192,4                                                                               |
|                    | 5,0     | 208,9                                                                               | 155,1                                                                               |
| 80                 | 3,2     | 320,0                                                                               | 238,6                                                                               |
|                    | 3,6     | 285,3                                                                               | 212,6                                                                               |
|                    | 4,0     | 257,5                                                                               | 191,7                                                                               |
|                    | 5,0     | 207,7                                                                               | 154,4                                                                               |
| 90                 | 6,3     | 166,5                                                                               | 123,4                                                                               |
|                    | 3,2     | 319,1                                                                               | 238,1                                                                               |
|                    | 4,0     | 256,6                                                                               | 191,2                                                                               |
|                    | 5,0     | 206,8                                                                               | 153,8                                                                               |
| 100                | 6,3     | 165,6                                                                               | 122,9                                                                               |
|                    | 7,1     | 147,7                                                                               | 109,5                                                                               |
|                    | 3,2     | 318,4                                                                               | 237,7                                                                               |
|                    | 4,0     | 256,0                                                                               | 190,9                                                                               |
| 120                | 5,0     | 206,1                                                                               | 153,4                                                                               |
|                    | 6,3     | 164,9                                                                               | 122,5                                                                               |
|                    | 7,1     | 147,0                                                                               | 109,1                                                                               |
|                    | 3,2     | 317,5                                                                               | 237,2                                                                               |
|                    | 4,0     | 254,9                                                                               | 190,2                                                                               |
|                    | 5,0     | 205,0                                                                               | 152,8                                                                               |
|                    | 6,3     | 163,7                                                                               | 121,9                                                                               |
|                    | 7,1     | 145,9                                                                               | 108,5                                                                               |

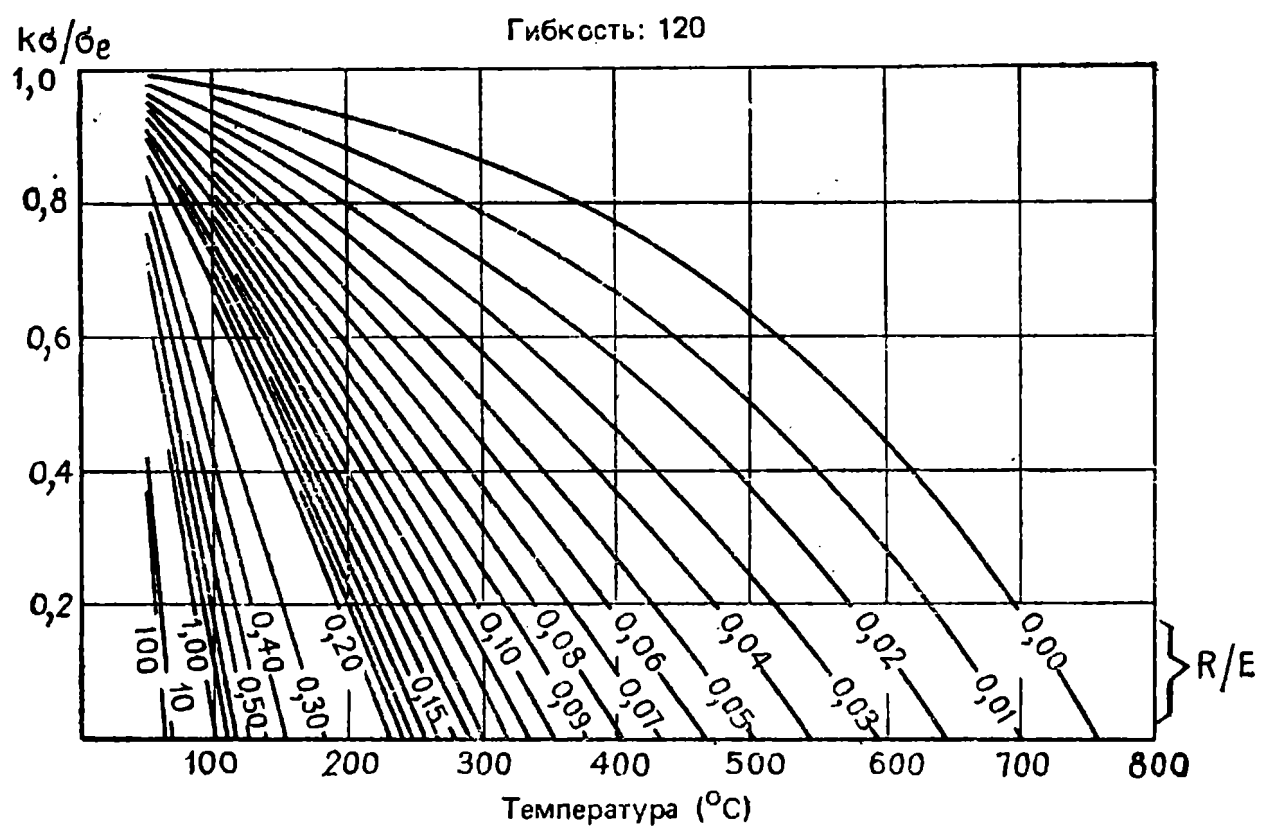
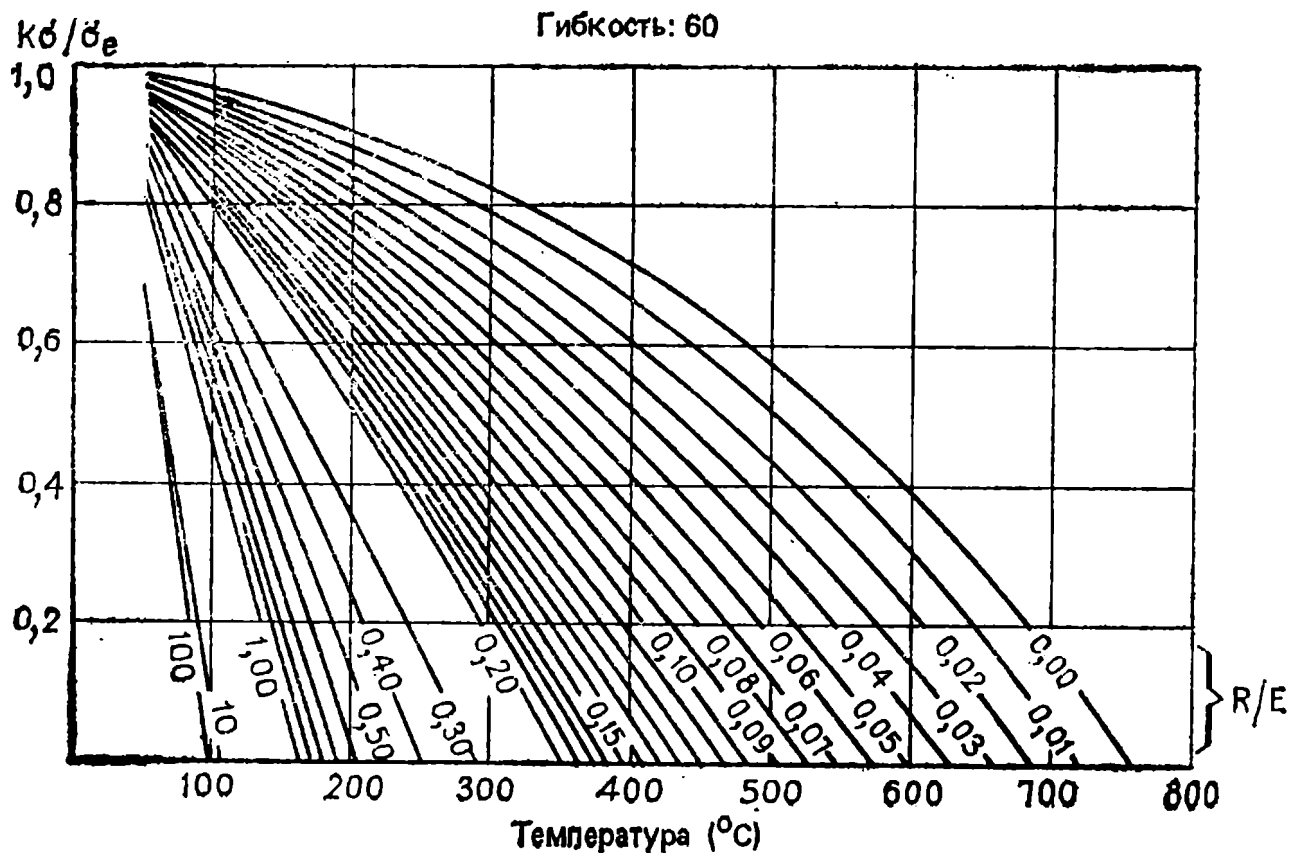
**Приложение III. КОЭФФИЦИЕНТЫ СТАТИЧЕСКОЙ  
НЕОПРЕДЕЛИМОСТИ**

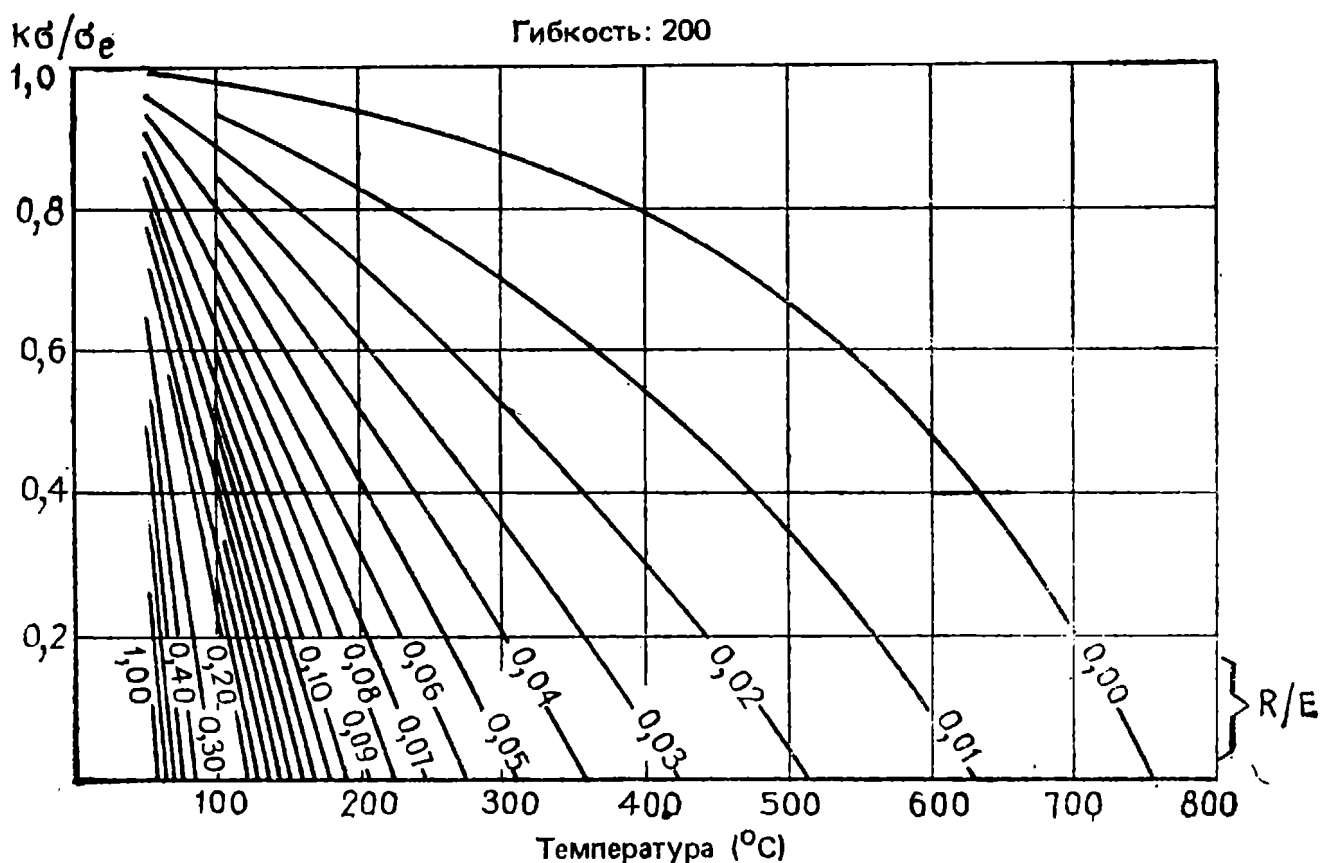
| Система и нагрузка | $\chi$ |
|--------------------|--------|
|                    | 1,5    |
|                    | 1,152  |
|                    | 1,2    |
|                    | 1,129  |
|                    | 1,261  |
|                    | 1,2    |
|                    | 1,285  |
|                    | 1,727  |
|                    | 1,333  |
|                    | 1,5    |
|                    | 1      |
|                    | 1,664  |
|                    | 1,105  |
|                    | 1,680  |

| Система и нагрузка | $\chi$ |
|--------------------|--------|
|                    | 1,218  |
|                    | 1,400  |
|                    | 1,200  |
|                    | 1,275  |
|                    | 1,050  |
|                    | 1,018  |
|                    | 1,285  |
|                    | 1      |
|                    | 1,126  |
|                    | 1      |
|                    | 1      |
|                    | 1,248  |
|                    | 1,412  |
|                    | 1,264  |

**Приложение IV. НОМОГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
КРИТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЭЛЕМЕНТОВ  
КОНСТРУКЦИИ СО СТЕСНЕННОЙ  
ПРОДОЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ  
ДЕФОРМАЦИЕЙ [4.4]**

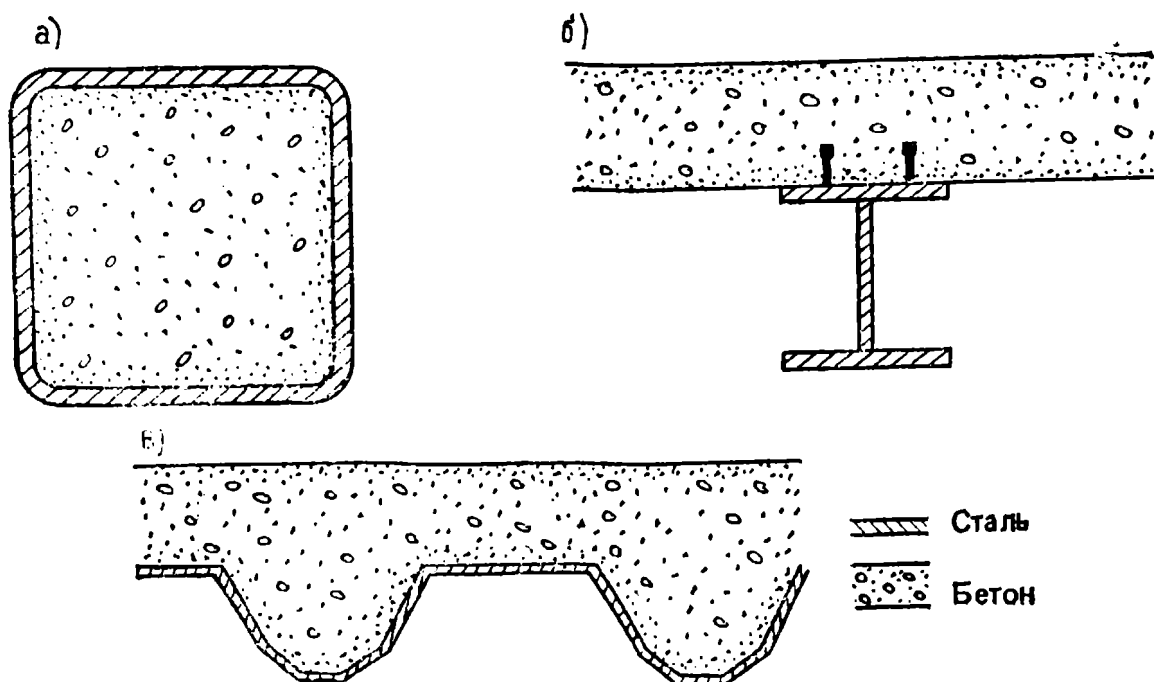






## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [4.1] *Les matériaux et les techniques de protection contre l'incendie des charpentes métalliques.* — C.A.T.E.D., 6, rue Lapérouse, 75784 Paris CEDEX 16.
- [4.2] M. Bourguignon, J. F. Behets. — *Guide pour la protection des éléments de construction en acier contre l'incendie.* C.B.L.I.A., 47, rue Montoyer, 1040 Bruxelles, Belgique.
- [4.3] *Wassergefüllte Stützen im Stahlbau.* — Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf, R.F.A.
- [4.4] C.T.I.C.M. — *Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en acier.* Revue Construction Métallique n° 4-1976, CTICM, 20, rue Jean-Jaurès Puteaux, France.
- [4.5] J. F. Behets. — *Étude de la résistance au feu des éléments métalliques protégés.* C.B.L.I.A., 47, rue Montoyer, 1040 Bruxelles, Belgique.
- [4.6] L. Twilt. — *European Recommendations for fire safety of building structures*, part III. Draft for European Convention of Constructional Steelwork, commission 3, 1977.
- [4.7] O. Pettersson, S. E. Magnusson, J. Thor. — *Fire Engineering Design of Steel Structures.* Swedish Institute of Steel Construction, Drottning Kristinas Väg 48, S-11428, Stockholm, Sweden.
- [4.8] J. H. Mc Guire, W. W. Stanzak, M. Law. — *The scaling of fire resistance problems.* Fire Technology, vol. 11, n° 3, august 1975.
- [4.9] G. V. L. Bond. — *Water cooled hollow columns*, Constrado. 12 Addiscombe road, Croydon CR 9 3JH. England.
- [4.10] E. de Kerversau, G. R. Genier. — *Physiologie de l'acier.* Éditions Sedom 1972.
- [4.11] D. H. Skinner. — *Determination of high temperature properties of Steel.* BHP technical bulletin, vol. 16, 1972. Melbourne Research Laboratories.
- [4.12] J. E. Dorn. — *Progress in understanding high temperature creep.* Grillet Memorial lecture, ASTM. 1962.
- [4.13] C. Zener, J. H. Hollomon. — *Effects of strain rate on the plastic flow of steel.* Journal of applied phys. vol. 15—1944.
- [4.14] T. Z. Harmathy. — *A comprehensive creep model.* N.R.C.C. Ottawa, Canada sept. 1967.



**РИС. 5.1**

*а* — стальная колонна, заполненная бетоном; *б* — комплексная балка; *в* — бетонная плита по стальному листовому/профилированному настилу, используемому как опалубка и включаемому в работу конструкции

[4.15] J. Kruppa. — *Resistance au feu des structures métalliques en température non homogène*. Thèse. Institut National des Sciences Appliquées, Rennes, juin 1977.

[4.16] C.T.I.C.M. — *Recommandations pour le calcul en plasticité des constructions en acier*. Revue Construction Métallique n° 4 déc. 75.

[4.17] C T I C M — *Méthodes des calcul aux états limites des structures à barres*. Séminaire C.T.I.C.M. Puteaux. nov. 1972.

[4.18] C.T.I.C.M. — ICES PEP. *Programme élasto-plastique des structures planes à barres par la méthode pas à pas*. Doc. n° SI 0176. Centre Technique Industriel de la construction métallique. Puteaux.

[4.19] P. Arnault, H. Ehm, J. Kruppa. — *Évolution des températures dans des poteaux extérieurs soumis à des incendies*. Doc. CECM 3.74/7F. mai 1974.

[4.20] G. Lamboley. — *Les moyens de protection des charpentes en acier*. C.T.I.C.M. Stage de perfectionnement technique. St-Rémy-lès-Chevreuse, 13—15 avril 1977.

## Глава 5. ОГНЕСТОЙКОСТЬ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### 5.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Так как бетон и сталь, имеют свои достоинства и недостатки и в обычном состоянии, и в условиях пожара, в настоящее время получают все более широкое развитие конструкции, сочетающие в себе оба материала, с тем чтобы недостатки одного из них компенсировать достоинствами или преимуществами другого (рис. 51.).

Методы расчета комплексных сталежелезобетонных конструкций являются в настоящее время в значительной степени эмпирическими, тем более что их огнестойкость с трудом поддается оценке. В связи с этим стальные или полностью железобетонные конструкции систематически приходится испытывать. Тем не менее по

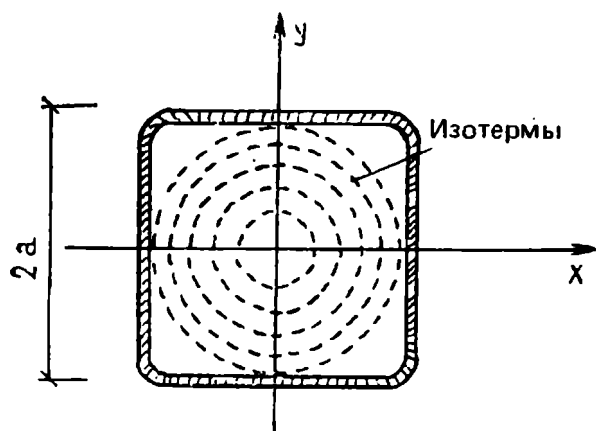


РИС. 5.2

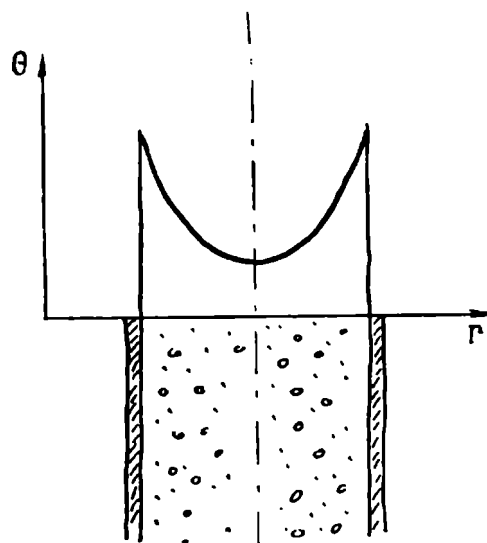


РИС. 5.3

мере увеличения числа проведенных испытаний на огнестойкость постепенно становится возможным выявить влияние (по крайней мере, качественное) основных факторов и предложить некоторые упрощенные модели, описание которых и составляет предмет настоящей главы.

При этом следует отметить, что колонны, заполненные бетоном, были ранее предметом систематических исследований [5.1], в то время как действительная работа других конструкций (смешанные балки и плиты со стальной листовой опалубкой, включаемой в работу конструкции) может быть рассмотрена лишь на основе отдельных экспериментальных исследований [5.2, 5.3].

Напомним также, что теплофизические характеристики стали и железобетона, используемые в приводимых ниже теоретических рассуждениях, уже проанализированы нами в гл. 3 и 4. Рассматриваемые воздействия соответствуют Единым техническим документам по огнестойкости стальных [5.4] и железобетонных [5.5] конструкций (см. разд. 4.4 и 3.6).

## 5.2. КОЛОННЫ ЗАМКНУТОГО СЕЧЕНИЯ, ЗАПОЛНЕННЫЕ БЕТОНОМ

Это конструктивное решение преследует цель использовать внутренний объем замкнутых профилей путем заполнения его бетоном или железобетоном. Таким образом достигается значительное повышение несущей способности колонны, а также резкое повышение ее огнестойкости даже при отсутствии какой-либо наружной защиты типа описанных в гл. 4. Во время пожара стальная оболочка такой колонны быстро нагревается, и в связи с ухудшением ее механических свойств нагрузка постепенно переносится на бетонное ядро, сохраняющее свою форму за счет стального «бандажа», которое предохраняет его от каких-либо серьезных повреждений. Вместе с тем бетон поглощает часть получаемого стальной оболочкой тепла вследствие высокой теплопроводности этого металла.

Комплексная сталежелезобетонная колонна по своим свойствам оказывается значительно ближе к железобетонной колонне, чем к стальной, поскольку стальная оболочка оказывается, по существу, опалуб-

кой, остающейся в бетоне. Для обеспечения достаточной огнестойкости колонны приходится пренебрегать несущей способностью указанной стальной оболочки. Однако при нормальных температурах такое конструктивное решение колонны обладает многочисленными достоинствами и широко применяется при индустриальном изготовлении конструкций.

**5.2.1. Приближенный метод расчета.** Этот метод [5.6] можно разделить на две последовательные стадии.

*Определение температурного поля в поперечном сечении.* Расчет основывается на приближенной гипотезе, согласно которой изотермы в квадратном или круглом поперечном сечении представляют собой концентрические окружности (рис. 5.2).

Кроме того, не учитывается испарение воды, которое влечет за собой образование «площадки» во времени при температуре около  $100^{\circ}\text{C}$ . Таким образом, предполагается параболическое распределение температуры по сечению (рис. 5.3).

Если колонна находится в условиях стандартного пожара (см. разд. 2.6), температуру  $\theta$  в точке на расстоянии  $r$  от центра сечения определяют по закону, который записывают в виде

$$\theta = \alpha t (r^2 + \beta) + \gamma, \quad (5.1)$$

где  $t$  — время;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  — эмпирические коэффициенты.

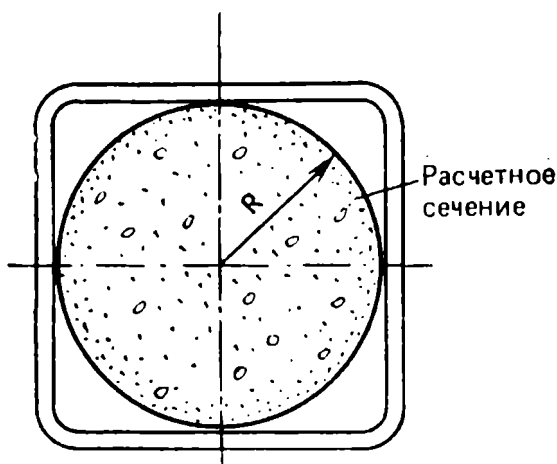


РИС. 5.4

Температуру металлической оболочки в случае отсутствия наружного огнезащитного слоя можно записать в виде логарифмической функции времени:

$$\theta = \alpha' \log \beta' t, \quad (5.2)$$

где  $\alpha'$  и  $\beta'$  — эмпирические коэффициенты.

При наличии наружного защитного слоя нагрев металлической колонны в первом приближении описывается линейной функцией времени:

$$\theta = \alpha' t + \beta'. \quad (5.3)$$

В табл. 5.1 приведены значения коэффициентов  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\alpha'$  и  $\beta'$  для некоторых типов сталежелезобетонных колонн.

*Определение предельной нагрузки.* Зная распределение температур по сечению, предельную несущую способность конструкции можно получить путем интегрирования прочности элементарных площадей ее поперечного сечения. Если колонна не защищена снаружи, то температура стали достаточно быстро (в течение 30—50 мин) достигает значений, при которых ее прочность становится пренебрежимо малой по сравнению с прочностью бетона. Аналогично можно не рассматривать бетон в углах сечения, ибо по тем же причинам его прочность значительно снижается. Поэтому в расчет принимают только круговое сечение бетона, как показано на рис. 5.4.

Наконец, мы предполагаем, что разрушение колонны происходит не вследствие потери устойчивости, а вследствие развития пласти-

Таблица 5.1

| Размеры колонны     |                | Характеристики бетона |                   | Защита           | $\alpha, ^\circ\text{C}/(\text{см}^2 \cdot \text{ч})$ | $\beta \text{ см}^2$ | $\gamma ^\circ\text{C}$ | $\alpha' (4)$ | $\beta' (5)$ |
|---------------------|----------------|-----------------------|-------------------|------------------|-------------------------------------------------------|----------------------|-------------------------|---------------|--------------|
| $2a, \text{мм} (2)$ | $e, \text{мм}$ | $W_e/c (1)$           | осадка конуса (3) |                  |                                                       |                      |                         |               |              |
| 225                 | 3,6            | 0,5                   | 10                | —                | 2,8                                                   | 42,86                | —                       | 564,73        | 0,579        |
| 140                 | —              | —                     | 1,5               | —                | 13                                                    | 20                   | —                       | 564,72        | 0,556        |
| 160                 | —              | —                     | 5,8               | —                | 1,7                                                   | 26                   | —                       | 630           | 0,387        |
| 225                 | —              | 0,55                  | —                 | Вермикулит 22 мм | 0,46                                                  | 132,3                | 0                       | 140           | 0            |
| —                   | —              | —                     | 5                 | —                | 0,59                                                  | 107                  | 0                       | 158,5         | 0            |
| 140                 | —              | —                     | 5,5               | Асбест 40 мм     | 0,62                                                  | 257                  | —50                     | 205           | —80          |
| —                   | —              | 0,5                   | —                 | Гипс 20 мм       | 0,6                                                   | 200                  | 0                       | 310           | —115         |

Примечания: 1.  $W_e$  — вода затворения,  $\text{кг}/\text{м}^3$  бетона;  $c$  — расход цемента,  $\text{кг}/\text{м}^3$  бетона;  $W_e/c$  — В/Ц отношение;  
 2.  $a$  — половина стороны бетонного ядра;  
 3.  $\alpha$  — испытание подвижности бетонной смеси осадкой конуса;  
 4.  $\alpha'$  выражается в  $^\circ\text{C}$  для незащищенных профилей и в  $^\circ\text{C}/\text{ч}$  — для защищенных профилей;  
 5.  $\beta'$  выражается в  $\text{ч}^{-1}$  для незащищенных профилей и в  $^\circ\text{C}$  — для защищенных профилей.

ческих деформаций в бетоне и арматуре. В связи с этим данный метод невозможно применить ни к толстым трубам, когда прочностью стали нельзя пренебречь, ни к гибким колоннам, которые могут быстро терять устойчивость.

Предельная нагрузка при простом сжатии представляет собой сумму усилий, воспринимаемых бетоном и арматурой:

$$P_u = P_b + P, \quad (5.4)$$

причем

$$P_b = \int_0^R \sigma'_{j\theta} 2\pi r dr, \quad (5.5)$$

где  $\sigma'_{j\theta}$  — прочность бетона при сжатии при температуре  $\theta$  на  $j$ -й день пожара ( $j \geq 90$ ).

С помощью соотношения (5.5) можно определить площадь  $\Omega_e$  эквивалентного сечения с учетом распределения температуры

$$\Omega_e = \int_0^R \frac{\sigma'_{j\theta}}{\sigma'_j} 2\pi r dr, \quad (5.6)$$

откуда

$$P_b = \sigma'_j \Omega_e. \quad (5.7)$$

В качестве примера примем следующие изменения прочности бетона по [5.5]:

| $\theta$                      | 0 | 250 | 600  | 1000 |
|-------------------------------|---|-----|------|------|
| $\sigma'_{j\theta}/\sigma'_j$ | 1 | 1   | 0,45 | 0    |

При этом возможны три варианта изменения прочности бетона в зависимости от температуры.

1. Температура цилиндрического бетонного ядра остается ниже  $250^{\circ}\text{C}$ . При этом  $\Omega_e = \pi R^2$ , однако рассмотренный метод не применить нельзя, поскольку металл оболочки и бетон в угловых зонах воспринимают усилия, которыми невозможно пренебречь. Поэтому здесь придется прибегнуть к более точному методу, изложенному ниже (разд. 5.2.2.).

2. Температура в центре ядра не превышает  $250^{\circ}\text{C}$ , а в периферийной зоне находится в пределах от  $250$  до  $600^{\circ}\text{C}$ . Это наиболее распространенный случай при длительности действия огня не более 90 мин. Тогда имеем

$$\Omega_e = \int_0^{r_0} 2\pi r dr + \int_{r_0}^R [1 - \delta (\theta - 250)] 2\pi r dr, \quad (5.8)$$

где  $\delta$  — угол наклона кривой  $\sigma'_\theta/\sigma'_j = f(\theta)$  в интервале от  $250$  до  $600^{\circ}\text{C}$ ;  $\delta = 1/637$ ;  $r_0$  — полярный радиус слоя с температурой  $250^{\circ}\text{C}$ .

Зная благодаря формуле (5.1) изменение температуры в зависимости от времени, получим

$$\Omega_e = \pi R^2 \left[ 1 - \frac{\delta}{2\alpha t R^2} (\theta_R - 250)^2 \right]. \quad (5.9)$$

С помощью этой формулы можно определить эквивалентное сечение при длительности  $t$  действия стандартного пожара. Тогда по формуле (5.7) определяют остаточную прочность бетона.

3. Температура бетонного ядра находится в пределах от  $250$  до  $600^{\circ}\text{C}$ . Этот случай соответствует огнестойкости более 2 ч. При этом имеем

$$\Omega_e = \pi R^2 \left[ 1 - \frac{\delta}{2\alpha t R^2} (\theta_R - 250)^2 + \frac{\delta}{2\alpha t R^2} (\theta_0 - 250)^2 \right]. \quad (5.10)$$

В формулах (5.9) и (5.10) величины  $\theta_0$  и  $\theta_R$  означают температуры в центре ( $r = 0$ ) и на периферии ( $r \approx a/2$ ) цилиндрического бетонного ядра.

Если  $\theta_R > 600^{\circ}\text{C}$ , то аналогичным образом можно получить новые формулы, поскольку изменяется лишь наклон  $\delta$ .

В то же время предельную нагрузку  $P_a$  на арматуру можно определить по формуле

$$P_a = \sum_i \omega_i \sigma_e(\theta_i), \quad (5.11)$$

где  $\omega_i$  — сечение  $i$ -й арматуры, расположенной на расстоянии  $r_i$  от центра сечения;  $\sigma_e(\theta_i)$  — предел текучести  $i$ -й арматуры, расположенной на расстоянии  $r_i$  от центра сечения, при температуре  $\theta_i$ .

Принимается, что температура  $\theta_i$  равна температуре бетона на том же расстоянии от центра сечения (см. разд. 3.5). Для этого можно использовать зависимость предела текучести арматуры  $\sigma_e(\theta)$  от температуры, предложенную в [5.5]:

| $\theta$                    | 0 | 250 | 750 |
|-----------------------------|---|-----|-----|
| $\sigma_e(\theta)/\sigma_e$ | 1 | 1   | 0   |

Поэтому для арматуры, температура которой не превышает 250 °С, имеем

$$I P_c = \sigma_e \sum_i \omega_i, \quad (5.12)$$

а для арматуры при температуре более 250 °С

$$I P_c = \sigma_e \sum_i \omega_i \left[ \frac{3}{2} - \frac{\alpha t}{500} (r_{i,j}^2 + \beta) \right]. \quad (5.13)$$

Уравнение (5.7) с помощью формул (5.8)—(5.10), а также уравнения (5.12) и (5.13) позволяют определить предел несущей способности колонны при пожаре, который остается лишь сравнить с нагрузкой, воспринимаемой колонной в действительности.

На основе сравнения с экспериментальными данными [5.6] можно заключить, что этот метод дает удовлетворительные результаты для труб квадратного и круглого сечения, хотя в последнем случае мы располагаем данными сравнительно небольшого числа испытаний. Следует отметить, что приведенный метод приемлем лишь в том случае, когда предел огнестойкости равен не менее 30 мин, так как должна сохранять свою силу гипотеза о потере прочности металлической оболочки.

**5.2.2. Уточненный метод.** Изложенный метод применим только к трубчатым сечениям, не имеющим наружной защиты. При этом достаточно произвольно предполагается, что распределение температур по сечению подчиняется параболическому закону, а изотермы являются концентрическими. Однако только расчет теплопередачи на основе метода конечных элементов или метода конечных разностей может дать более точное представление о распределении температур. И все же трудности этого метода и его иллюзорная точность, а также неоднородность бетона заставляют отказаться от его применения и пользоваться формулами (5.1)—(5.3).

Определение разрушающей нагрузки можно производить более точно с помощью теории Гио и Янса [5.7], согласно которой при центрально приложенной нагрузке деформации стали и бетона одинаковы, а предельная нагрузка (несущая способность колонны) равна эйлеровской критической нагрузке [5.8] в пластической стадии, определяемой из выражений

$$P_1 = (\pi^2/l^2) (E_a^* I_a + E_b^* I_b + E_c^* I_c); \quad (5.14)$$

$$P_2 = \Omega_a \sigma_a + \Omega_b \sigma_b + \Omega_c \sigma_c; \quad (5.15)$$

$$\varepsilon_a = \varepsilon_b = \varepsilon_c = \varepsilon; \quad (5.16)$$

$$P_1 = P_2, \quad (5.17)$$

где  $l$  — расчетная длина колонны;  $E^*$  — касательный модуль  $I$  — момент инерции сечения;  $\Omega$  — площадь сечения;  $\sigma$  — сжимающее напряжение;  $\varepsilon$  — удлинение (индексы:  $a$  — сталь,  $b$  — бетон,  $c$  — арматура).

Моменты инерции  $I_a$ ,  $I_b$  и  $I_c$  следует определять относительно одной и той же оси. Коэффициенты  $E^*$ ,  $I$  и  $\Omega, \sigma$  зависят от времени — в момент

$t$  они представляют собой интегралы бесконечно малых элементов при температуре  $\theta_i$ . Согласно [5.8], эти коэффициенты определяют следующим образом.

Для стали характеристику  $\sigma - \epsilon$  определяют по данным Европейской конвенции по металлическим конструкциям:

$$\sigma_a = A\sigma_e + BE_a \epsilon + C (E_a^2 \epsilon^2 / \sigma_e) + D (E_a^3 \epsilon^3 / \sigma_e^2), \quad (5.18)$$

где  $A = -0,6$ ;  $B = 1,416$ ;  $C = -0,651$ ;  $D = 0,103$ .

Касательный модуль связан с модулем Юнга соотношением

$$E_a^* = E_a [B + 2C (E_a \epsilon / \sigma_e) + 3D (E_a^2 \epsilon^2 / \sigma_e^2)]. \quad (5.19)$$

Кроме того, законы изменения  $\sigma_e$  и  $E_a$  в зависимости от температуры определяются формулами (4.21)—(4.23), приведенными в гл. 4. Укажем их здесь в более простом виде:

$$E_a(\theta) = E_a f(\theta); \quad (5.20)$$

$$\sigma_e(\theta) = \sigma_e g(\theta). \quad (5.21)$$

Отсюда получим

$$\begin{aligned} E_a^* I_a = & BE_a \int \int f(\theta) y^2 dx dy + \frac{2CE_a^2 \epsilon}{\sigma_e} \int \int \frac{f^2(\theta)}{g(\theta)} y^2 dx dy + \\ & + \frac{3DE_a^3 \epsilon^2}{\sigma_e^2} \int \int \frac{f^3(\theta)}{g^2(\theta)} y^2 dx dy; \end{aligned} \quad (5.22)$$

и

$$\begin{aligned} \Omega_a \sigma_a = & A\sigma_e \int \int g(\theta) dx dy + BE_e \sigma_e \epsilon \int \int f(\theta) dx dy + \\ & + \frac{CE_a^2 \epsilon^2}{\sigma_e^2} \int \int \frac{f^2(\theta)}{g(\theta)} dx dy + \frac{DE_a^3 \epsilon^3}{\sigma_e^2} \int \int \frac{f^3(\theta)}{g^2(\theta)} dx dy. \end{aligned} \quad (5.23)$$

Для бетона в расчет вводят характеристики, определяемые соотношениями:

$$\sigma_b = E_b \epsilon [1 - (E_b \epsilon / 4\sigma_j')]; \quad (5.24)$$

$$E_b^* = E_b [1 - (E_b \epsilon / 2\sigma_j')]. \quad (5.25)$$

Законы изменения прочности на сжатие и модуля Юнга определяются соотношениями, приведенными в Едином техническом документе [5.5], которые имеют вид (см. гл. 3):

$$\sigma_{j\theta}' = \sigma_j^* k(\theta); \quad (5.26)$$

$$E_{b\theta} = E_b l(\theta), \quad (5.27)$$

откуда

$$E_b^* I_b = E_b \int \int l(\theta) y^2 dx dy - \frac{E_b \epsilon}{2\sigma_j'} \int \int \frac{l^2(\theta)}{k(\theta)} y^2 dx dy; \quad (5.28)$$

$$\Omega_b \sigma_b = E_b \epsilon \int \int l(\theta) dx dy - \frac{E_b^2 \epsilon^2}{4\sigma_j'} \int \int \frac{l^2(\theta)}{k(\theta)} dx dy. \quad (5.29)$$

Для арматуры принимают те же характеристики, что и для металла замкнутого профиля, за исключением предела текучести  $\sigma_e$  при нормальной температуре, который мы обозначим  $\sigma'_e$ . При этом получим

$$E_c^* I_c = BE_a \left( \sum_i \omega_i f(\theta_i) y_i^2 \right) + \frac{2CE_a^2 \varepsilon}{\sigma'_e} \left( \sum_i \omega_i \frac{f^2(\theta_i)}{g(\theta_i)} y_i^2 \right) + \frac{3DE_a^3 \varepsilon^2}{\sigma'^2_e} \left( \sum_i \omega_i \frac{f^3(\theta_i)}{g^2(\theta_i)} y_i^2 \right) \quad (5.30)$$

и

$$\Omega_c \sigma_c = A\sigma'_e \left[ \sum_i \omega_i g(\theta_i) \right] + BE_a \sigma'_e \varepsilon \left[ \sum_i \omega_i f(\theta_i) \right] + \frac{CE_a^2 \varepsilon^2}{\sigma'^2_e} \left[ \sum_i \omega_i \frac{f^2(\theta_i)}{g(\theta_i)} \right] + \frac{DE_a^3 \varepsilon^3}{\sigma'^3_e} \left[ \sum_i \omega_i \frac{f^3(\theta_i)}{g^2(\theta_i)} \right]. \quad (5.31)$$

После определения коэффициентов  $E^*I$  и  $\Omega\sigma$  с помощью формул (5.22), (5.23), (5.28)—(5.31) можно вычислить величины  $P_1$  и  $P_2$  по формулам (5.14) и (5.15). Затем из кубического уравнения  $P_1 - P_2 = 0$ , решаемого методом Ньютона, можно определить значение  $\varepsilon$ . Та-

Таблица 5.2

| Размеры профиля,<br>мм | Наружный защитный слой |      |       |            |          | Нагрузка, т | % от максимальной расчетной нагрузки | Предел огнестойкости, мин | Примечание |
|------------------------|------------------------|------|-------|------------|----------|-------------|--------------------------------------|---------------------------|------------|
|                        | вспучивающаяся краска  | гипс | Мабфэ | вермикулит | Альфапан |             |                                      |                           |            |
| 140×3,6                | □                      |      |       |            |          | 29          | 70                                   | 29                        | 2          |
| 100×4                  | □                      |      |       |            |          | 18          | 70                                   | 25                        |            |
| 114×5,4                | □                      |      |       |            |          | 8           | 20                                   | 45                        |            |
| 225×3,6                |                        | □    |       |            |          | 60          | 70                                   | 50                        |            |
| 225×3,6                |                        |      | □     |            |          | 60          | 70                                   | 63                        |            |
| 200×5                  |                        |      |       | □          |          | 88          | 70                                   | 60                        |            |
| 200×10                 |                        |      |       | □          |          | 186         | 70                                   | 93                        |            |
| 120×6                  |                        |      |       |            | □        | 50          | 70                                   | 63                        |            |

ким образом определяют удлинение  $\varepsilon_u$  и нагрузку  $P_u$  в предельном состоянии. Отсюда нетрудно найти характеристику устойчивости колонны.

**5.2.3. Результаты экспериментальных исследований.** В табл. 5.2—5.7 читатель найдет результаты экспериментальных исследований [5.1].

Максимальная расчетная нагрузка, указанная в таблицах, представляет собой предельную нагрузку, найденную по методу Гио и Янса [5.7], где в качестве сопротивления бетона на сжатие использо-

вано расчетное значение из параболической диаграммы с линейным участком (разд. 3.6.4).

Т а б л и ц а 5.3. Колонны, заполненные цементным раствором

| Размеры<br>профиля, мм | Вспучива-<br>ющаяся<br>краска | Вспучива-<br>ющееся<br>покрытие | Нагрузка, т | % от макси-<br>мальной<br>расчетной<br>нагрузки | Предел<br>огнестойко-<br>сти, мин |
|------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 120×4                  |                               | □                               | 24          | 70                                              | 52                                |
|                        | □                             |                                 |             |                                                 | 46                                |
|                        | □                             |                                 |             |                                                 | 56                                |
| 135×4                  |                               | □                               | 29,5        |                                                 | 66                                |
| 100×4                  | □                             |                                 | 18          |                                                 | 60                                |

Т а б л и ц а 5.4. Колонны, заполненные железобетоном

| Размеры<br>профиля, мм | Нагрузка, т | % от максимальной<br>нагрузки | Предел огнестой-<br>кости, мин | Примеча-<br>ния |   |
|------------------------|-------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------|---|
| 225×3,6                | 105         | 46                            | 94                             |                 |   |
|                        | 155         | 80                            | 60                             |                 |   |
|                        | 136         | 70                            | 84                             |                 |   |
|                        | 132         |                               | 73                             |                 |   |
|                        |             |                               | 55                             |                 |   |
|                        | 97          | 50                            | 110                            |                 |   |
|                        | 58          | 30                            | 80                             |                 |   |
|                        | 56          |                               | 137                            |                 |   |
| 200×5                  | 74          | 30                            | 80                             |                 | 4 |
|                        | 125         | 50                            | 39                             |                 | 4 |
|                        | 78,5        |                               | 52                             |                 |   |
|                        | 121         | 70                            | 87                             |                 | 3 |
| 160×3,6                | 54          | 50                            | 61                             |                 | 4 |
|                        | 58,5        |                               | 48                             |                 |   |
|                        | 82          | 70                            | 25                             |                 |   |
| 160×6,3                | 83          | 50                            | 35                             |                 |   |
|                        | 83          |                               |                                |                 |   |
| 300×7                  | 110         | 30                            | 192                            |                 |   |
|                        | 183         | 50                            | 136                            |                 |   |
|                        | 257         | 70                            | 57                             |                 |   |
| 140×3,6                | 41          | 40                            | 46                             |                 |   |

Таблица 5.5. Колонны, заполненные бетоном

| Размеры<br>профиля, мм | Наружный защитный слой   |       |                          |                          |                          |                          | Нагрузка, т | % от максимальной расчетной нагрузки | Предел огнестойкости, мин | Примечания |
|------------------------|--------------------------|-------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------|--------------------------------------|---------------------------|------------|
|                        | минеральная вата         | мабфэ | гипсовая скорлупа        | гипс                     | Альфапан                 | Промабест                |             |                                      |                           |            |
| 140×3,6                | <input type="checkbox"/> |       |                          |                          |                          |                          | 74          | 80                                   | 47                        | 1          |
|                        | <input type="checkbox"/> |       |                          |                          |                          |                          | 64          | 70                                   | 56                        | 1          |
|                        | <input type="checkbox"/> |       |                          |                          |                          |                          | 46          | 50                                   | 110                       | 1          |
|                        | <input type="checkbox"/> |       |                          |                          |                          |                          | 72          | 70                                   | 78                        |            |
|                        |                          |       |                          | <input type="checkbox"/> |                          |                          | 75          | 70                                   | 119                       |            |
|                        |                          |       |                          |                          | <input type="checkbox"/> |                          | 54          | 50                                   | 145                       |            |
|                        |                          |       |                          |                          | <input type="checkbox"/> |                          | 78          | 70                                   | 186                       |            |
|                        |                          |       |                          | <input type="checkbox"/> |                          |                          | 22          | 20                                   | 202                       |            |
|                        |                          |       |                          |                          |                          | <input type="checkbox"/> | 64          | 70                                   | 87                        |            |
|                        |                          |       |                          |                          |                          |                          |             |                                      | 118                       |            |
|                        |                          |       |                          |                          |                          |                          |             |                                      | 143                       |            |
|                        |                          |       |                          |                          |                          |                          |             |                                      |                           |            |
| 200×5                  |                          |       | <input type="checkbox"/> |                          |                          |                          | 121         | 70                                   | 87                        |            |
|                        |                          |       |                          |                          |                          | <input type="checkbox"/> | 153         |                                      | 137                       |            |
|                        |                          |       |                          |                          | <input type="checkbox"/> |                          | 145         |                                      | 229                       |            |
|                        |                          |       |                          | <input type="checkbox"/> |                          |                          | 145         |                                      | 118                       |            |
|                        |                          |       | <input type="checkbox"/> |                          |                          |                          | 153         |                                      | 95                        |            |
| 225×3,6<br>140×3,6     | <input type="checkbox"/> |       |                          |                          |                          |                          | 132         | 70                                   | 48                        |            |
|                        |                          |       |                          | <input type="checkbox"/> |                          |                          | 132         |                                      | 96                        |            |
|                        |                          |       | <input type="checkbox"/> |                          |                          |                          | 62          |                                      | 158                       |            |

Примечание к указанным таблицам: 1 — испытание колонн, шарнирно закрепленных по концам; 2 — круглые профили; 3 — легкий бетон, 4 — бетон; армированный стальной проволокой.

Эти испытания, несмотря на их многочисленность, позволяют выявить лишь качественное влияние отдельных факторов — степени нагружения, эффекта массы, качества бетона и др.

Таблица 5.6. Колонны, заполненные бетоном

| Размеры<br>профиля, мм | Нагрузка, т | % от максимальной<br>нагрузки | Предел огнестой-<br>кости, мин | Приме-<br>чания |
|------------------------|-------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------|
| 140×3,6                | 53          | 50                            | 28                             | 3               |
|                        | 53          |                               | 24                             |                 |
|                        | 68,5        | 70                            | 24                             |                 |
|                        | 41          | 40                            | 42                             |                 |
|                        | 19          | 20                            | 66                             |                 |
| 225×3,6                | 130         | 80                            | 16                             |                 |
|                        | 108,5       | 50                            | 56                             |                 |
|                        | 152         | 70                            | 42                             |                 |
|                        | 43          | 20                            | 165                            |                 |
|                        | 100         | 50                            | 36                             |                 |
| 200×5                  | 95          | 50                            | 36                             |                 |
|                        | 78,5        |                               | 47                             |                 |
| 265×4                  | 130         | 60                            | 22                             |                 |
| 406×12,5               | 450         | 60                            | 36                             | 2               |
| 265×4                  | 91          | 50                            | 68                             |                 |
| 225×8                  | 197         | 70                            | 29                             |                 |
|                        | 1405        | 50                            | 40                             |                 |
|                        | 56          | 20                            | 131                            |                 |

**5.2.3.1. Степень нагружения.** Степенью нагружения в данном случае называется отношение приложенной нагрузки к максимальной расчетной нагрузке.

На рис. 5.5 и 5.6 показано повышение огнестойкости по мере снижения степени нагружения. Так, для профиля квадратного сечения 225 × 3,6 мм, заполненного бетоном, предел огнестойкости составляет 42 мин при степени нагружения 0,7; 56 мин при степени нагружения 0,5 и 165 мин при степени нагружения 0,2.

Таблица 5.7. Колонны, заполненные бетоном

| Размеры<br>профиля, мм | Вспучи-<br>вающаяся<br>краска | Верми-<br>кулит | Нагрузка, т | % от макси-<br>мальной<br>расчетной<br>нагрузки | Предел<br>огнестойко-<br>сти, мин | Приме-<br>чания     |
|------------------------|-------------------------------|-----------------|-------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------|---------------------|
| 140×3,6                | □                             |                 | 37          | 54                                              | 74                                |                     |
|                        |                               |                 | 67          | 70                                              | 46                                |                     |
|                        |                               |                 | 49,5        | 50                                              | 60                                |                     |
|                        |                               |                 | 68,5        | 70                                              | 55                                |                     |
|                        |                               |                 | 49          | 50                                              | 54                                |                     |
|                        |                               |                 | 51          |                                                 | 58                                |                     |
|                        | □                             | □               | 76          | 70                                              | 192                               |                     |
|                        |                               |                 | 62          |                                                 | 197                               |                     |
| 225×3,6                | □                             |                 | 92,5        | 57                                              | 91                                | 1<br><br>1<br><br>1 |
|                        | □                             | □               | 144         | 70                                              | 191                               |                     |
|                        |                               |                 |             |                                                 | 130                               |                     |
|                        |                               |                 |             |                                                 | 117                               |                     |
|                        |                               |                 | 96          | 47                                              | 205                               |                     |
|                        |                               |                 | 100         | 70                                              | 290                               |                     |
|                        |                               |                 | 191         |                                                 | 248                               |                     |
| 180×3,6                | □                             |                 | 62          | 55                                              | 89                                | 2                   |
|                        |                               | □               | 101         | 70                                              | 241                               |                     |
| 219×3,6                | □                             |                 | 66          | 60                                              | 90                                |                     |
| 33×4,5                 | □                             |                 | 241         | 70                                              | 114                               |                     |
| 140×8                  |                               | □               | 106         | 70                                              | 200                               |                     |
| 200×5                  |                               |                 | 145         |                                                 | 240                               |                     |

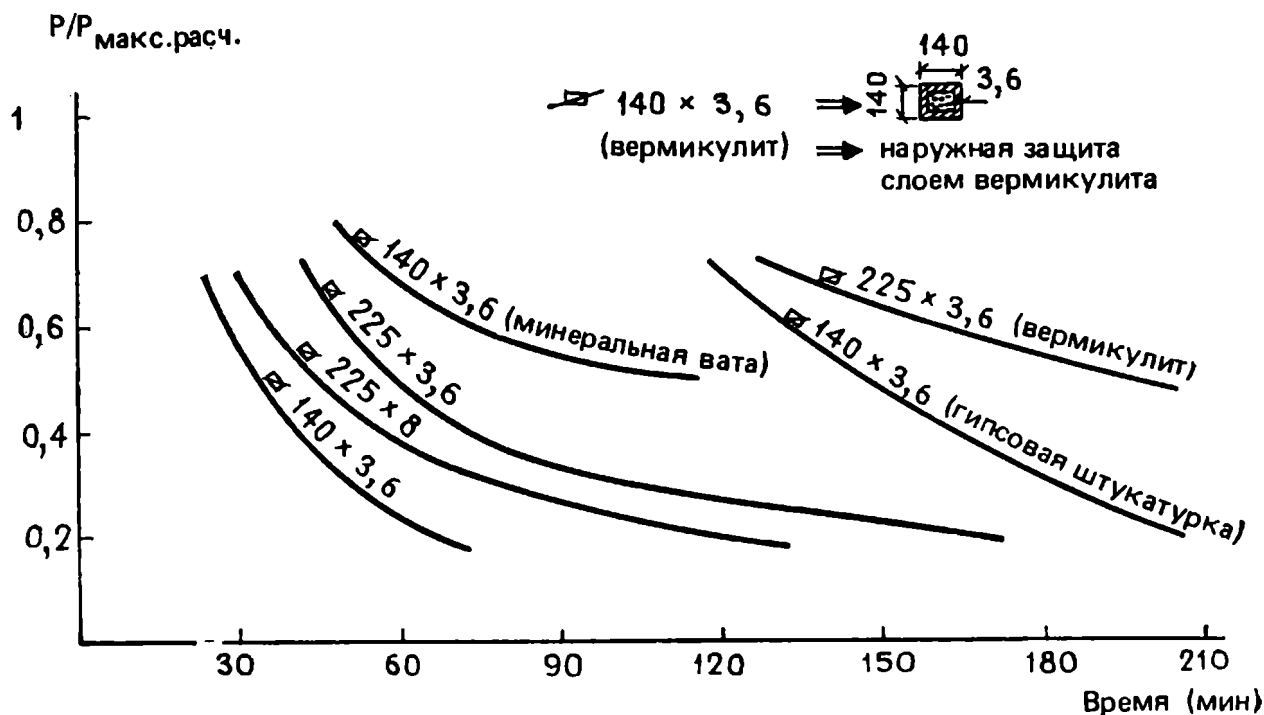


РИС. 5.5

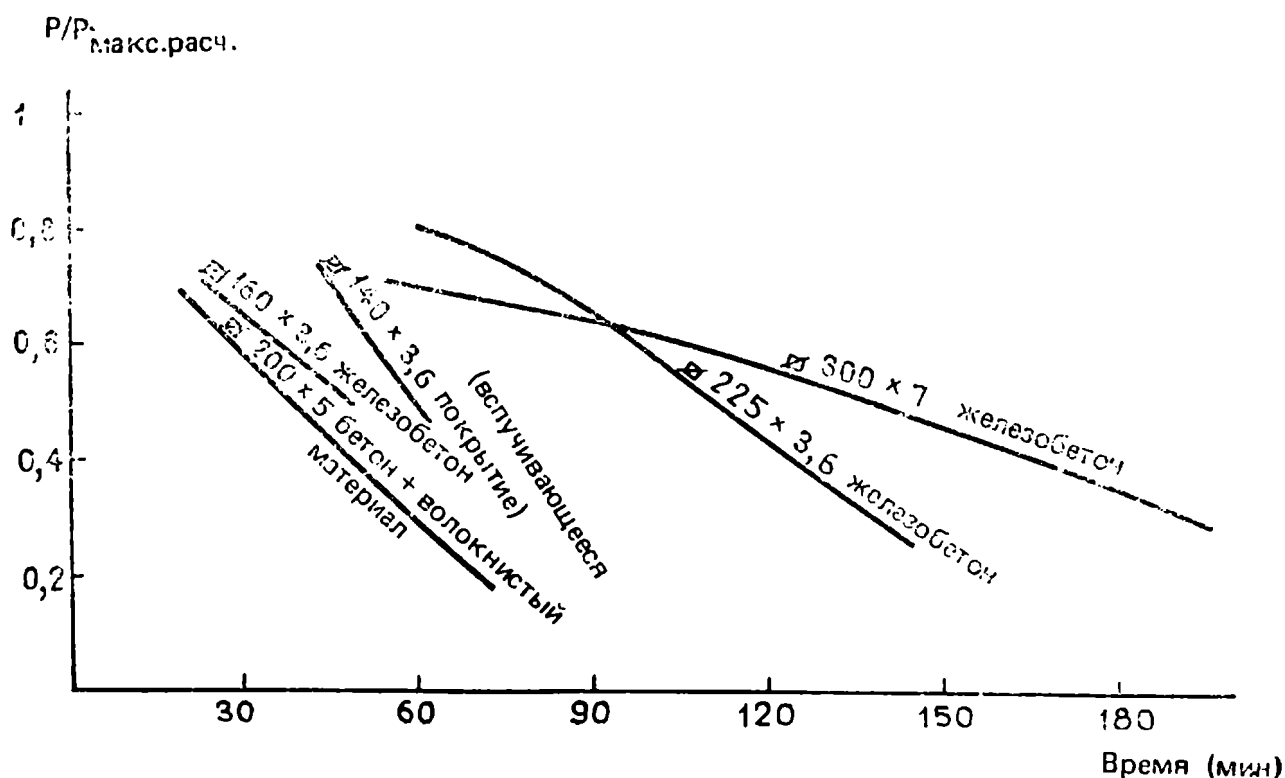


РИС. 5.6

**5.2.3.2. Эффект массы.** Бетонное ядро помимо своей несущей функции выполняет также роль теплового насоса, охлаждающего наружную стальную оболочку. Таким образом (см. рис. 5.5), при равной степени нагружения огнестойкость квадратного профиля (225×3,6 мм) выше огнестойкости аналогичного профиля (140 × 3,6 мм).

В свою очередь, увеличение толщины стального профиля способствует снижению его огнестойкости вследствие сильного его прогрева. Можно отметить, что предел огнестойкости профиля 225 × 3,6 мм выше предела огнестойкости профиля 225 × 8 мм. Это подтверждает ранее высказанную мысль о том, что смешанная сталебетонная или

железобетонно-стальная колонна с этой точки зрения ближе к железобетонной колонне, чем к стальной, поскольку наружная стальная оболочка, которую не следует принимать слишком толстой, играет лишь роль опалубки, остающейся в конструкции и предотвращающей разрушение бетона. Однако при наличии наружной защиты стального профиля это положение теряет свою силу. Тем не менее следует указать, что в этом случае толстая стальная оболочка является более рациональной, поскольку она меньше деформируется.

**5.2.3.3. Качество бетона.** При испытаниях [5.1] отмечено, что одинаковые незащищенные колонны, имеющие одинаковую степень нагружения, сопротивляются воздействию огня тем лучше, чем ниже прочность бетона. Этот парадокс можно объяснить следующим образом: бетон плохого качества содержит много воды, и, следовательно, имеет более высокую теплоемкость; чем ниже прочность бетона, тем меньше величина максимальной расчетной нагрузки<sup>1</sup>. В этих условиях мало-нагруженная стальная часть колонны дольше выполняет свою функцию несущего элемента.

Наоборот, при наличии наружной огнезащиты значение бетонного ядра уменьшается, в связи с чем качество бетона оказывает меньшее влияние на огнестойкость.

Эти замечания никоим образом не означают, что следует заполнять колонны бетоном низкого качества. В действительности, при данной нагрузке более высокую огнестойкость имеет колонна с более высокой предельной нагрузкой, т.е. заполненная бетоном более высокого качества [см. уравнения (5.24)—(5.29)].

Некоторые испытания, проведенные на легком бетоне с расширяющимися сланцами, показали, что метод не дает сколь-нибудь обещающих результатов. И действительно, если легкий бетон нагревается медленнее, чем обычный, то он поглощает меньше тепла и, следовательно, способствует более быстрому нагреву стали, которая раньше перестает выполнять свои несущие функции. В связи с этим общий баланс оказывается неблагоприятным.

**5.2.3.4. Арматура.** Во избежание трудностей виброукладки бетона в колонны его армирование можно предусматривать только в том случае, когда сторона квадратного профиля составляет не менее 200 мм.

При испытаниях [5.1], результаты которых приведены в табл 5.4—5.9, арматура была подобрана таким образом, чтобы бетон начинал воспринимать всю нагрузку лишь после полной потери прочности стальной оболочки. При этом площадь сечения арматуры составляла 2—4% площади сечения бетона. Однако эта арматура не учитывалась при определении максимальной нагрузки при нормальной температуре.

Опыт показывает, что при правильном расположении арматуры в колонне можно без какой-либо дополнительной защиты достичь предела огнестойкости до 60—120 мин (рис. 5.7).

---

<sup>1</sup> Но относительная величина нагрузки при эксплуатации и соответственно при огневых испытаниях конструкции должна быть меньше для бетона большей прочности; поэтому объяснение отмеченного факта следует искать в характере и схеме разрушения. (*Примеч. науч. ред.*)

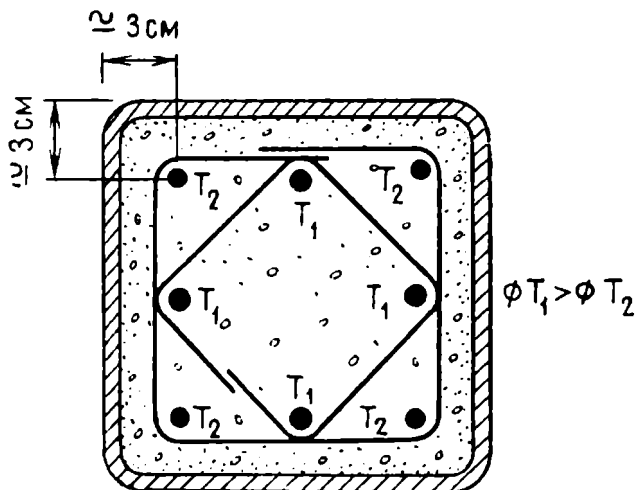


РИС. 5.7

**5.2.3.5. Принципы правильного конструирования.** Для максимального использования преимуществ стальных колонн, заполненных бетоном, при их проектировании и изготовлении следует соблюдать следующие правила:

заполнение бетоном стальных профилей квадратного сечения целесообразно, если сторона профиля составляет не менее 160 мм, что объясняется трудностью виброукладки бетона в колоннах малого сечения;

в верхней и нижней частях колонн следует предусматривать отверстия диаметром 10—12 мм для выпуска водяного пара;

эксплуатационные характеристики наносимых защитных покрытий зависят от типа их прикрепления. Например, при применении защитных покрытий в виде штукатурки следует предусматривать возможность свободной температурной деформации крепежных уголков.

### 5.3. КОМПЛЕКСНЫЕ БАЛКИ

Сочетание бетонной плиты и металлического профиля обеспечивает значительную экономию материалов, поскольку распределительная плита способствует повышению продольной устойчивости перекрытия. Это дает возможность уменьшить размер применяемого стального профиля. Для обеспечения оптимальной прочности такой конструкции необходимо, чтобы возникающий при изгибе сдвиг воспринимался специальными соединительными элементами, объединяющими бетон и сталь в единую систему (рис. 5.8).

Тщательный подбор соединительных элементов помогают осуществлять методы, основанные на законах упругости или теории пластичности [5.9, 5.10]. Мы предполагаем далее, что разрушение системы происходит не вследствие выхода из строя соединительных элементов, а обусловлено исчерпанностью несущей способности под действием нормальных напряжений от изгиба. Поэтому следует стремиться к применению гибких соединительных элементов, обладающих определенной деформационной способностью, которая предотвращает смятие бетона вблизи слишком жестких соединительных элементов [5.11]. Расчет смешанных балок на огнестойкость делится на две основные части: расчет температур и расчет разрушающей нагрузки.

**5.3.1. Расчет температур.** Рассмотрим по отдельности работу металлического профиля, сжатой зоны бетонной плиты и ее арматуры (рис. 5.9).

**5.3.1.1. Нагрев металлического профиля.** Предполагается, что нижняя, обращенная к огню полка профиля нагревается независимо от остальной его части. При этом ее температуру следует определять по указаниям, изложенным в разд. 4.3.2, при массивности  $S/V$ , равной:

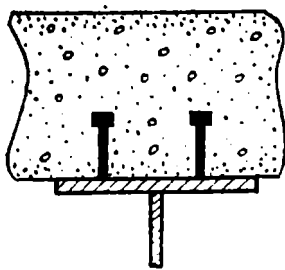


РИС. 5.8

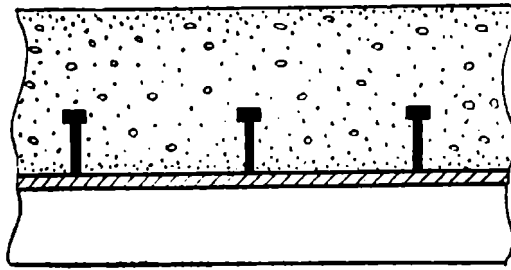


РИС. 5.9

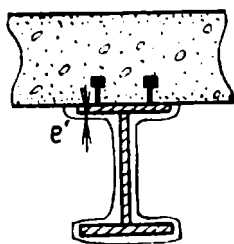
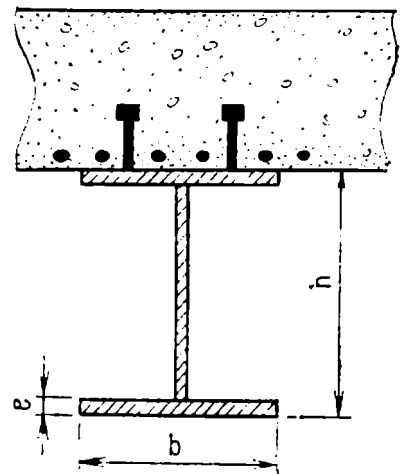


РИС. 5.10

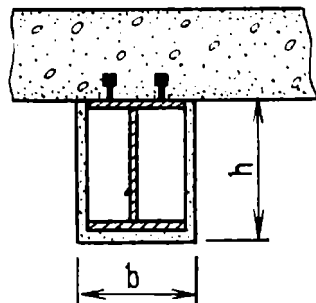


РИС. 5.11

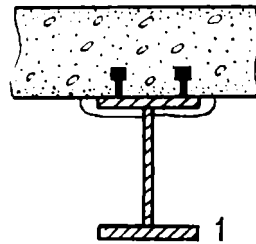
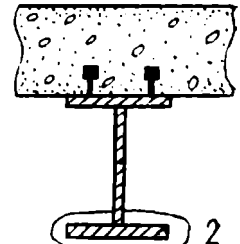


РИС. 5.12



2/e. Аналогичным образом можно определить температуру верхней полки, коэффициент массивности которой составляет  $1/e$ . В последнем случае мы пренебрегаем теплоотдачей бетона, что обеспечивает определенный запас. Однако следует отметить, что это свойство бетона можно учесть лишь на основе очень сложного расчета.

Температуру стенки можно определить таким же образом. Однако опыт [5.5] показывает, что в качестве ее температуры можно принять полусумму температур полок.

Для ускорения расчета можно получить среднюю температуру профиля по формуле (4.3), определяя его коэффициент массивности с помощью формулы

$$S/V = (P - b)/A, \quad (5.32)$$

где  $P$  и  $A$  — соответственно периметр и площадь сечения профиля.

Если профиль защищен непосредственно примыкающим к нему защитным слоем (рис. 5.10), то нагрев полок определяют с учетом их массивности ( $1/e$  и  $2/e$ ) при помощи номограмм, приведенных в прил. 1 к гл. 4. Температуру стенки здесь также принимают равной среднему значению температур полок.

Такой прием можно использовать лишь при  $e'/h \leq 0,15$ . В противном случае гипотезой о независимом нагреве полок и стенки пользоваться нельзя, ибо защитный слой становится предопределяющим.

Если профиль защищен плитным или листовым материалом, образующим короб (рис. 5.11), то полки и стенку нецелесообразно рассматривать по отдельности. Следует найти среднюю температуру профиля по

номограммам прил. 1 к гл. 4, определяя коэффициент массивности по формуле

$$S/V = (2h + b)/A. \quad (5.33)$$

Можно также разделить нижнюю полку и нижнюю половину стенки и определять нагрев обеих частей, принимая коэффициенты массивности равными соответственно

$$S/V = 2(h + b)/A; \quad (5.34)$$

$$S/V = 2h/A. \quad (5.35)$$

Наконец, в случае частичной защиты (рис. 5.12) профиля расчет производится путем рассмотрения по отдельности полок и стенки.

*Пример.* Как оценить нагрев профиля IPE 140 после 15 мин пребывания в условиях стандартного пожара?

Если профиль не защищен, то коэффициенты массивности его нижней и верхней полки составляют соответственно 290 и 145 м<sup>-1</sup>. Данные из табл. 4.4 показывают, что после 15-минутного нагрева их температуры равны соответственно 712 и 635 °С. Тогда температура стенки составляет 673 °С. При использовании формулы (5.32) получим среднюю температуру 710 °С, свидетельствующую о еще более высоком нагреве.

Если металлический профиль каким-либо образом защищен, то его предел огнестойкости при действии огня будет больше не менее чем на четверть часа. Поэтому будем рассматривать его нагрев после пребывания в условиях стандартного пожара в течение 30 мин.

Например, если профиль по контуру покрыт слоем Промабеста толщиной 5 мм, то нижняя полка имеет температуру 485 °С, верхняя — 300 °С, а температура стенки составляет 392 °С (прил. 1 к гл. 4).

Если профиль защищен плитками Паннофэ, то по формуле (5.33) его коэффициент массивности равен 215,2 м<sup>-1</sup>. При толщине защитного материала 20 мм его температура составляет 260 °С. По формулам (5.34) и (5.35) получим температуру нижней и верхней полки — соответственно 300 и 220 °С.

Наконец, если только нижняя полка защищена покрытием из Промабеста толщиной 5 мм, то ее температура равна 485 °С, в то время как температура незащищенной верхней полки достигает примерно 820 °С.

**5.3.1.2. Нагрев бетона.** В разд. 3.5 указаны температуры, которые достигаются в бетонных плитах при нагреве. Однако требование по несущей способности к конструкции при действии огня всегда сопровождается требованием класса CF к ней по прогреву (см. разд. 1.3), согласно которому температура на противоположной (т. е. не обращенной к огню) поверхности плиты должна не превышать 140 °С в течение времени, обусловленного нормами. Поэтому можно предположить, что температура в сжатой зоне бетона остается ниже 250 °С. В связи с этим [5.5] его механические свойства не подвергаются изменениям.

**5.3.1.3. Нагрев арматуры.** Принимается, что арматура имеет ту же температуру, что и окружающий ее бетон, поэтому расчет следует производить по указаниям разд. 3.5. При этом мы пренебрегаем защитным действием верхней полки металлического профиля.

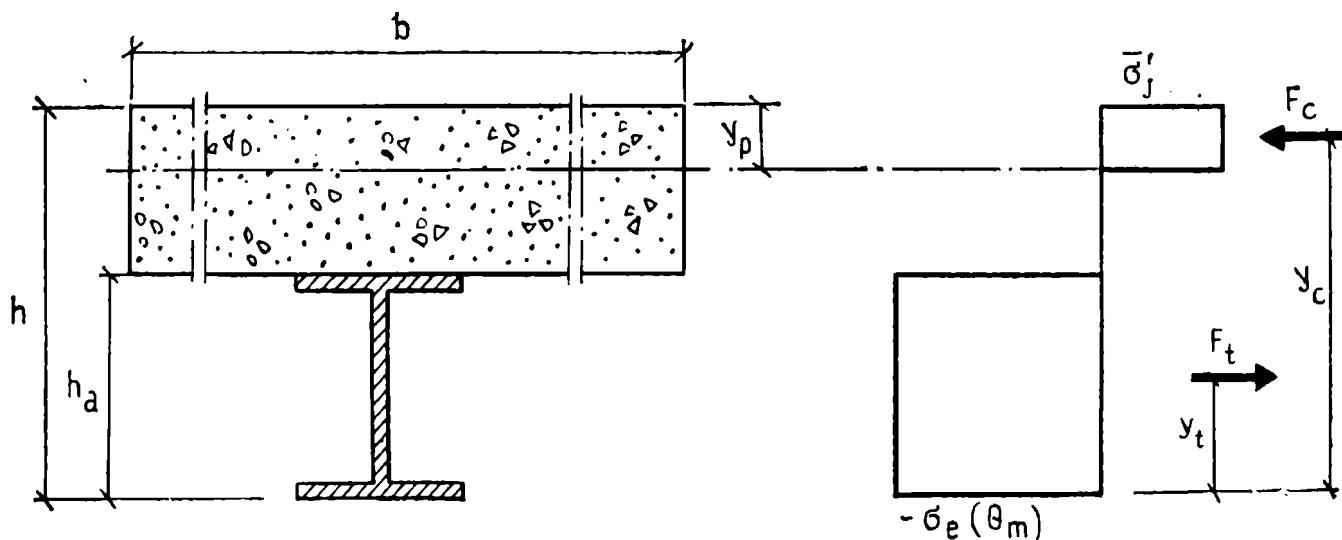


РИС. 5.13

**5.3.2. Определение несущей способности.** Для определения несущей способности комплексной балки в условиях пожара необходимо знать моменты, воспринимаемые каждым поперечным сечением.

Пластический момент в сечении достигается, когда сталь полностью перешла в пластическую стадию ( $\sigma = \sigma_e$ ) и по всему сечению бетона действует расчетное разрушающее напряжение  $\bar{\sigma}_j = \sigma'_j/1,5$ . Предполагается, что сопротивление бетона на растяжение равно нулю.

Простота определения этого пластического момента зависит от дискретизации температур в стальном профиле. Ниже приведены два различных метода расчета, в каждом из которых предполагается, что нейтральная ось ( $\sigma = 0$ ) проходит в бетонной плите, арматура отсутствует, а температура в сжатой зоне бетона не превышает  $250^\circ\text{C}$  (см. разд. 5.3.1.2). Если эти гипотезы не соответствуют действительности, придется прибегать к более сложным методам расчета, элементы которых читатель найдет в приложении к настоящей главе.

**5.3.2.1. Упрощенный метод [5.12].** Здесь предполагается, что температура по сечению профиля одинакова и равна  $\theta_m$ . Эпюра напряжений, по которой в этих условиях определяется пластический момент, приведена на рис. 5.13.

Зная  $\theta_m$ , с помощью формул (4.21) и (4.22) определяем  $\sigma_e(\theta_m)$ , откуда несущая способность профиля составляет

$$F_t = A \sigma_e(\theta_m), \quad (5.36)$$

где  $A$  — площадь его сечения, а индекс  $t$  означает растяжение.

Это усилие уравнивается сжатием бетона по высоте  $y_p$ :

$$F_c = y_p b \bar{\sigma}_j. \quad (5.37)$$

При простом сжатии  $F_b = F_c$ , откуда

$$y_p = (\sigma_e(\theta_m) A / b \bar{\sigma}_j). \quad (5.38)$$

Далее находим точки приложения сил  $F_t$  и  $F_c$ :

$$y_t = h_a/2 = (h - e)/2, \quad (5.39)$$

$$y_c = h - y_p/2, \quad (5.40)$$

плечо

$$z = y_c - y_t = (h + e - y_p)/2, \quad (5.41)$$

пластический момент

$$M_p(\theta_m) = z F_t \quad (5.42)$$

или

$$M_p(\theta_m) = \frac{A\sigma_e(\theta_m)}{2} \left[ h + e - \frac{A\sigma_e(\theta_m)}{b\bar{\sigma}'_j} \right]. \quad (5.43)$$

В качестве простого критерия разрушения можно принять, что пластический момент в наиболее нагруженном сечении равен моменту внешних сил. Тогда из уравнения (5.43) можно получить максимально допустимую температуру в металлическом профиле. Отсюда можно прежде всего найти  $\sigma_e(\theta_m)$ :

$$\sigma_e(\theta_m) = [A(h + e) b \bar{\sigma}'_j - \sqrt{\Delta}] / 2A^2, \quad (5.44)$$

где

$$\Delta = A^2(h + e)^2 b^2 \bar{\sigma}'_j{}^2 - 8A^2 b \bar{\sigma}'_j M_{\max};$$

$M_{\max}$  — наибольший момент внешних сил.

Зная закон  $\sigma_e(\theta)/\sigma_e = f(\theta)$  (см. рис. 4.22), можно отсюда непосредственно определить  $\theta_m$ .

Затем следует убедиться в том, что температура сжатой зоны не превышает 250 °С. В противном случае нужно заменить  $\bar{\sigma}'_j$  на  $\bar{\sigma}'_{j\theta}$  в функции температуры  $\theta$  (см. табл. 5.2).

В случае неразрезных балок необходимо также определить пластический момент на опоре, отличающийся от момента в пролете. С этой целью пренебрегаем нижней продольной арматурой, а также бетоном, поскольку в нем к этому времени обычно имеются трещины. При этом следует различать два случая в зависимости от расположения нейтральной оси в стенке или в верхней полке профиля.

Поскольку опыт показывает, что температура верхней арматуры остается ниже 250 °С и сохраняет предел текучести, как при нормальной температуре (см. табл. 5.3).

а) Нейтральная ось расположена в верхней полке профиля (рис. 5.14). При этом выполняется неравенство

$$S_1 \sigma_{er} < A\sigma_e(\theta_m) \leq S_1 \sigma_{er} + 2\sigma_e(\theta_m) b_p e_p, \quad (5.45)$$

где  $S_1$  и  $\sigma_{er}$  — соответственно суммарная площадь сечения и предел текучести арматуры.

Пластический момент при этом определяется из выражения

$$M'_p(\theta_m) = A\sigma_e(\theta_m) \frac{h_a}{2} + S_1 \sigma_{er} d_1. \quad (5.46)$$

б) Нейтральная ось расположена в стенке профиля. При этом выполняется неравенство

$$A\sigma_e(\theta_m) > S_1 \sigma_{er} + 2\sigma_e(\theta_m) b_p e_p. \quad (5.47)$$

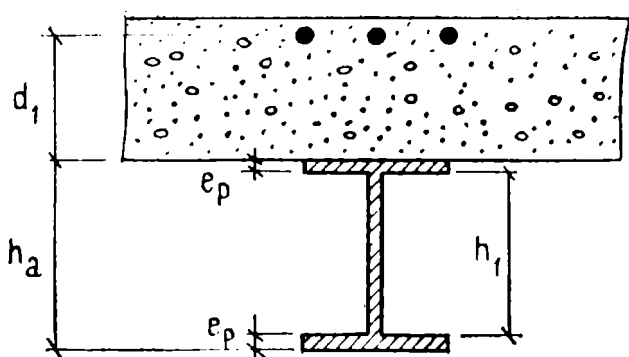


РИС. 5.14

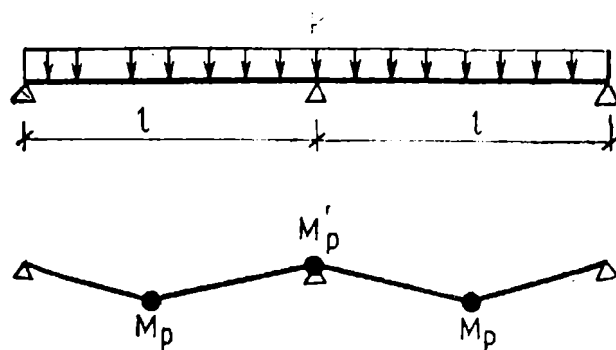


РИС. 5.15

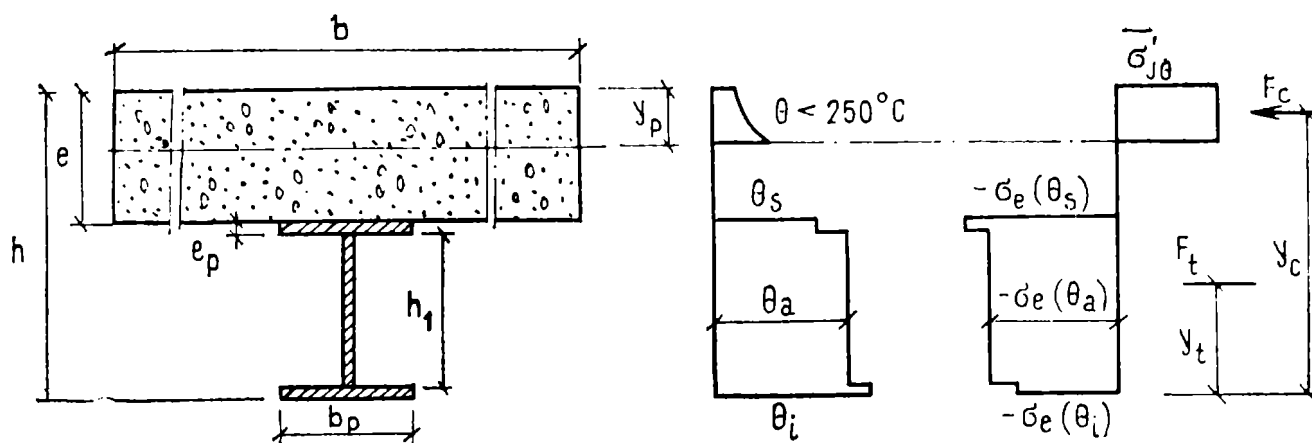


РИС. 5.16

В этом случае пластический момент близок к величине, определяемой соотношением

$$M'_p(\theta_m) = A\sigma_e(\theta_m) \frac{h_a}{2} - b_p e_p^2 \sigma_e(\theta_m) + S_1 \sigma_e d_1. \quad (5.48)$$

Разумеется, такой прием оправдан, только если пластический шарнир на опоре имеет достаточную деформационную способность, позволяющую избежать разрыва арматуры (см. прил. к гл. 3).

Найдя таким образом пластический момент на опоре, следует рассмотреть вероятный механизм разрушения, т.е. последовательность образования пластических шарниров. Механизм разрушения равномерно нагруженной балки на трех опорах при условии одинаковой температуры по сечению профиля показан на рис. 5.15.

При таком механизме разрушающая нагрузка, определяемая с помощью теоремы о виртуальных работах, составляет

$$P_u = [4M'_p(\theta_m) + 8M_p(\theta_m)]/l^2. \quad (5.49)$$

По существу, выражение (5.49) предполагает, что пластические шарниры образуются в середине пролетов, а такое предположение является неточным, если моменты  $M_p$  и  $M'_p$  не равны между собой. Если они значительно отличаются, следует применять более приближенную формулу:

$$P_u = \frac{2M'_p(\theta_m) + 4M_p(\theta_m)}{l^2} + \frac{2}{l^2} \sqrt{[M'_p(\theta_m) + 2M_p(\theta_m)]^2 - M_p'^2(\theta_m)}. \quad (5.50)$$

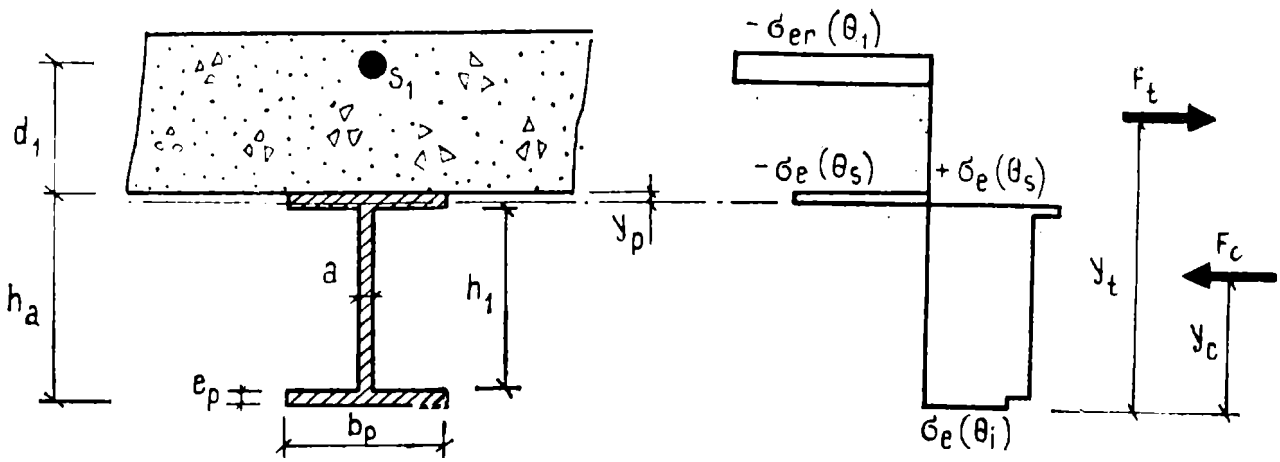


РИС. 5.17

**5.3.2.2. Общий метод.** Этот метод подробно изложен в приложении к настоящей главе. Поэтому здесь мы рассмотрим лишь его применение для расчета профилей с одинаковыми полками, для которых эпюра напряжений соответствует приведенной на рис. 5.16 с учетом гипотез, изложенных во введении к разд. 5.3.2. Кроме того, как и в разд. 5.3.2.1, предполагается, что в смешанной балке не возникают нормальные усилия.

Отсюда получим:

$$y_p = F_t / \sigma'_j b; \quad (5.51)$$

$$F_t = e_p b_p [\sigma_e(\theta_i) + \sigma_e(\theta_s)] + a h_1 \sigma_e(\theta_a); \quad (5.52)$$

$$y_t = \frac{1}{F_t} \left[ \frac{b_p e_p^2}{2} \sigma_e(\theta_i) + a h_1 \sigma_e(\theta_a) \left( e_p + \frac{h_1}{2} \right) + e_p b_p \sigma_e(\theta_s) \left( h_1 - \frac{e_p}{2} \right) \right]; \quad (5.52)$$

$$y_c = h - y_p / 2; \quad (5.53)$$

$$M_p(\theta) = (y_c - y_t) F_c. \quad (5.54)$$

Момент на опоре можно определить более точно, чем по указаниям разд. 5.3.2.1, с учетом температур в нижней полке ( $\theta_i$ ), в стенке ( $\theta_a$ ), в верхней полке профиля ( $\theta_s$ ), а также в арматуре плиты ( $\theta_1$ ). Здесь также различаются два варианта в зависимости от положения нейтральной оси.

а) Нейтральная ось расположена в верхней полке профиля (рис. 5.17). При этом выполняется неравенство

$$S_1 \sigma_{er}(\theta_1) < e_p b_p [\sigma_e(\theta_i) + \sigma_e(\theta_s)] + a h_1 \sigma_e(\theta_a) \leq S_1 \sigma_{er}(\theta_1) + 2 \sigma_e(\theta_s) b_p e_p. \quad (5.55)$$

Пластический момент можно определить путем решения системы уравнений:

$$F_t = F_c = S_1 \sigma_{er}(\theta_1) + y_p b_p \sigma_{se}(\theta_s); \quad (5.56)$$

$$y_p = \frac{1}{2 b_p \sigma_e(\theta_s)} \{ h_1 a \sigma_e(\theta_a) + b_p e_p [\sigma_e(\theta_i) + \sigma_e(\theta_s)] - S_1 \sigma_{er}(\theta_1) \}; \quad (5.57)$$

$$y_t = \frac{1}{F_t} \left[ S_1 \sigma_{er}(\theta_1) (d_1 + h_a) + y_p b_p \sigma_e(\theta_s) \left( h_a - \frac{y_p}{2} \right) \right]; \quad (5.58)$$

$$y_c = \frac{1}{F_c} \left[ \frac{b_p}{2} e_p^2 \sigma_e(\theta_i) + h_1 a \sigma_e(\theta_a) \left( e_p + \frac{h_1}{2} \right) + b_p e_p \sigma_e(\theta_s) \left( h_1 + \frac{3e_p - y_p}{2} \right) \right]; \quad (5.59)$$

$$M'_p(\theta) = (y_t - y_c) F_t. \quad (5.60)$$

б) Нейтральная ось расположена в стенке профиля. При этом выполняется неравенство (рис. 5.18).

$$e_p b_p \sigma_e(\theta_i) + a h_1 \sigma_e(\theta_a) > S_1 \sigma_{er}(\theta_1) + e_p b_p \sigma_e(\theta_s), \quad (5.61)$$

а пластический момент  $M'_p(\theta)$  можно найти из решения системы уравнений:

$$F_c = e_p b_p \sigma_e(\theta_i) + a (h_1 - y_p) \sigma_e(\theta_a) = F_t; \quad (5.62)$$

$$y_p = \frac{1}{2a\sigma_e(\theta_a)} \{ e_p b_p [\sigma_e(\theta_i) - \sigma_e(\theta_s)] + a h_1 \sigma_e(\theta_a) - S_1 \sigma_{er}(\theta_1) \}; \quad (5.63)$$

$$y_t = \frac{1}{F_t} \left[ S_1 \sigma_{er}(\theta_1) (d_1 + h_a) + e_p b_p \sigma_e(\theta_s) \times \left( h_a - \frac{e_p}{2} \right) + a y_p \sigma_e(\theta_a) \left( h_a - e_p - \frac{y_p}{2} \right) \right]; \quad (5.64)$$

$$y_c = \frac{1}{F_c} \left[ b_p e_p^2 \frac{\sigma_e(\theta_i)}{2} + (h_1 - y_p) a \sigma_e(\theta_a) \left( e_p + \frac{h_1 - y_p}{2} \right) \right]; \quad (5.65)$$

$$M'_p(\theta) = (y_t - y_c) F_t. \quad (5.66)$$

**5.3.3. Практические результаты.** Проведенные экспериментальные исследования [5.3] в сочетании с теоретическими расчетами позволяют сделать ряд выводов:

пластический момент возрастает пропорционально пределу текучести стали;

значение прочности бетона оказывает незначительное влияние на пластический момент;

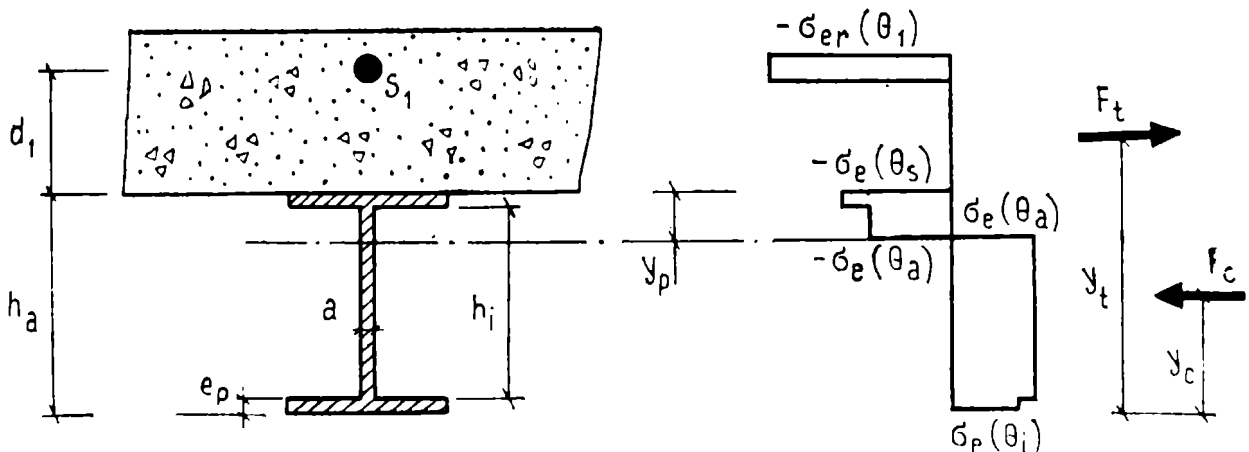


РИС. 5.18

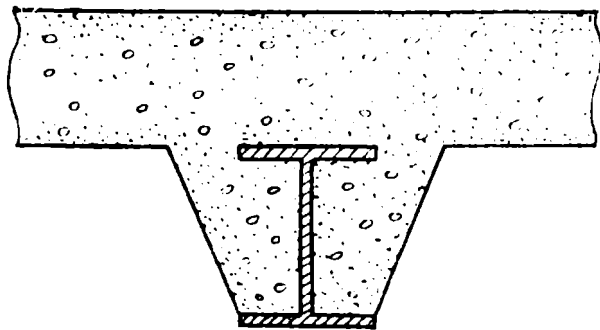


РИС. 5.19

защита нижней полки стального профиля является более эффективной, чем защита верхней полки;

в плитах без каких-либо защитных покрытий арматура играет весьма незначительную роль<sup>1</sup>;

наиболее высокого предела огнестойкости конструкция достигает при обетонировании стального профиля, даже если нижняя полка остается незащищенной (рис. 5.19).

#### 5.4. ПЛИТЫ СО СТАЛЬНОЙ ЛИСТОВОЙ ОПАЛУБКЕЙ, ОСТАЮЩЕЙСЯ В БЕТОНЕ И ВКЛЮЧАЕМОЙ В РАБОТУ КОНСТРУКЦИИ

При таком конструктивном решении стальная листовая опалубка играет двойную роль, так как она одновременно заменяет обычную опалубку и арматуру, воспринимающую растягивающие усилия. Механическая работа при нормальной температуре в значительной степени определяется сцеплением стального листа с бетоном. К сожалению, при пожаре стальной лист быстро нагревается и теряет значительную часть своей прочности. Кроме того, сцепление стали с бетоном падает при повышении температуры. Поэтому весьма затруднительно в таких случаях получить достаточно большой предел огнестойкости, за исключением тех вариантов, когда можно предотвратить нагрев стального листа или повысить несущую способность плиты. Для этого следует либо нанести защитное покрытие на стальную опалубку, либо снабдить плиту дополнительной арматурой. Однако в обоих случаях при теоретическом подходе мы сталкиваемся с незнанием действительного сцепления стальной опалубки с бетоном. Поэтому в настоящее время надежный метод расчета таких конструкций еще не создан.

**5.4.1. Арматура плиты.** При отсутствии какого-либо защитного слоя мы вынуждены полагать, что стальной лист не способствует повышению прочности плиты, если иметь в виду предел огнестойкости более 1 ч. Арматуру подбирают так же, как и для обычной железобетонной плиты, т.е. по указаниям гл. 3. Тем не менее, не обладая собственной прочностью, стальной лист ограничивает нагрев бетона и предотвращает его растрескивание, поскольку потеря сцепления между опалубкой и бетоном приводит к образованию изолирующего воздушного зазора. Таким образом, при одинаковом армировании бетонная плита со стальным листом, который играет роль опалубки, остающейся в конструкции и включаемой в ее работу, отличается более высокой огнестойкостью, чем обычная железобетонная плита.

**5.4.2. Защита стального листа.** Ее осуществляют либо с помощью непосредственного нанесения какого-либо материала из числа указан-

<sup>1</sup> С этим выводом трудно согласиться, так как установка мощной арматуры в бетонных плитах может значительно повысить их предел огнестойкости. (Примеч. науч. ред.)

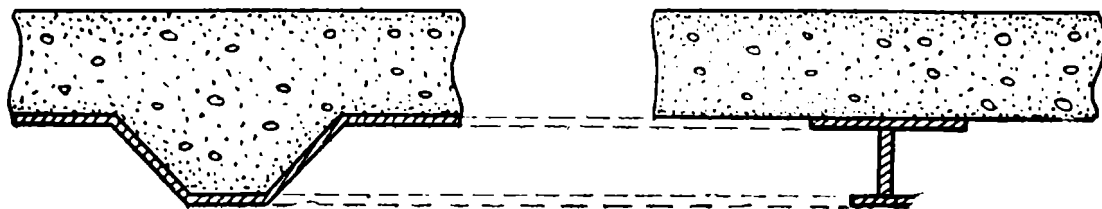


РИС. 5.20

ных в гл. 4, либо с помощью устройства подвесного потолка. При правильном выборе защитный слой позволяет сохранить значительную часть прочности листа, а также его сцепление с плитой.

При теоретическом подходе эту конструкцию можно уподобить смешанной балке (рис. 5.20), верхняя часть складки которой соответствует верхней полке профиля, нижняя часть складки — нижней полке, а промежуточная (вертикальная или наклонная) — стенке.

Учитывают также арматуру, которая вместе с листом воспринимает растягивающее усилие

$$F_t = \sum_i S_i \sigma_e(\theta_i), \quad (5.67)$$

где  $S_i$  — сечение листа.

Точка приложения силы  $F_t$  соответствует положению равнодействующей элементарных сил, воспринимаемых сечениями (см. приложение к настоящей главе).

Такая постановка может быть рационально использована только для статически определимых плит. В статически неопределимых плитах сцепление стали с бетоном играет слишком большую роль, в связи с чем недостаточные сведения об этом сцеплении исключают возможность какого бы то ни было теоретического подхода.

**5.4.3. Результаты экспериментальных исследований.** Рассматриваемые плиты явились объектом большого числа испытаний [5.14], проведенных либо в целях разработки их классификации для официальных нормативных документов, либо для систематического изучения влияния отдельных параметров [5.2]. К сожалению, последнее направление не позволяет строго сформулировать проблему, а дает возможность выявить лишь некоторые тенденции, которые вытекают иногда только из сравнения результатов двух испытаний.

**5.4.3.1. Толщина плиты.** Если температура нижней части складки не зависит от толщины плиты, то температура ее верхней части тем меньше, чем толще плита <sup>1</sup>. Аналогичным образом температура арматуры уменьшается по мере увеличения толщины бетона <sup>2</sup>.

**5.4.3.2. Высота складки.** Температура бетона не зависит от высоты складки стального листа. Напротив, температура в верхней его части тем ниже, чем больше высота складки. Для нижней части складки наблюдается обратная связь.

<sup>1</sup> Эта зависимость является значительно более сложной. (Примеч. науч. ред.).

<sup>2</sup> Только в том случае, если имеется в виду толщина защитного слоя. (Примеч. науч. ред.)

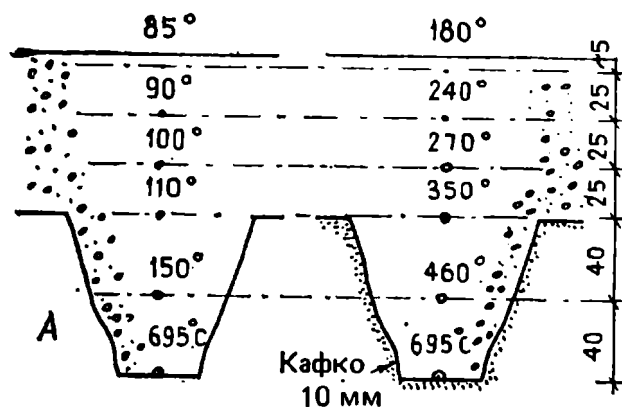


РИС. 5.21

**5.4.3.3. Арматура.** Естественно, при отсутствии наружного защитного слоя для стального листа наличие арматуры значительно повышает огнестойкость плиты. Например, при применении только нескольких стержней диаметром 8 мм огнестойкость плиты может быть повышена примерно в полтора раза.

**5.4.3.4. Защитные покрытия.**

На рис. 5.21 приведена сравнительная характеристика температур, замеренных для незащищенного листа и листа, защищенного слоем Кафко толщиной 10 мм (см. прил. 1 к гл. 4). В первом случае предел огнестойкости составляет 31 мин, а во втором — 116 мин.

Заметим, что относительная роль арматуры, расположенной на уровне А, существенно повышается при отсутствии защитного покрытия. При этом разница температуры листа и арматуры составляет 235 °С при наличии защитного слоя и 545 °С при его отсутствии.

Эти замечания преследуют цель оградить проектировщика от совершения слишком грубых ошибок. Только систематические экспериментальные исследования позволят разработать точные методы расчета огнестойкости плит со стальным профилированным листом, играющим роль опалубки, включаемой в работу конструкции.

## Приложение. МЕТОД РАСЧЕТА ПЛАСТИЧЕСКОГО МОМЕНТА В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ КОМПЛЕКСНОЙ БАЛКИ

**1. Обозначения и гипотезы.** На рис. 5.22 приведены используемые обозначения, а также эпюра распределения температуры по сечению. Кроме того, введем обозначения:  $S_1$  — площадь сечения арматуры;  $y_p$  — расстояние от нейтральной оси до верхней плоскости плиты.

Для температур используются следующие обозначения:  $\theta_i$  — температура нижней полки профиля;  $\theta_s$  — температура верхней полки профиля;  $\theta_a$  — температура нижней части стенки профиля;  $\theta_g$  — температура верхней части стенки (на длине  $g$ );  $\theta_r$  — температура арматуры, близкая к температуре бетона на той же высоте;  $\theta_b$  — температура бетона, изменяющаяся в зависимости от высоты плиты.

В расчете не учитываются растянутая зона бетона и закругления стальных профилей. Принимается также, что соединительные элементы обеспечивают идеальное сцепление плиты с профилем, обладая при этом достаточной гибкостью, допускающей значительные деформации. Наконец, не учитывается различное температурное расширение стали и бетона.

Прочностные характеристики бетона, а также стали арматуры и профиля подбираются по указаниям глав 3 и 4.

**2. Определение пластического момента.** Рассмотрим пять вариантов расположения оси в бетоне.

**2.1. Нейтральная ось расположена в бетоне выше арматуры.** При этом выполняется неравенство

$$F_t = e_i b_i \sigma_e(\theta_i) + a(h_1 - g) \sigma_e(\theta_a) + ag \sigma_e(\theta_g) + e_s b_s \sigma_e(\theta_s) + S_1 \sigma_{er}(\theta_r) \leq \bar{\sigma}'_{i\theta} bd. \quad (5.68)$$

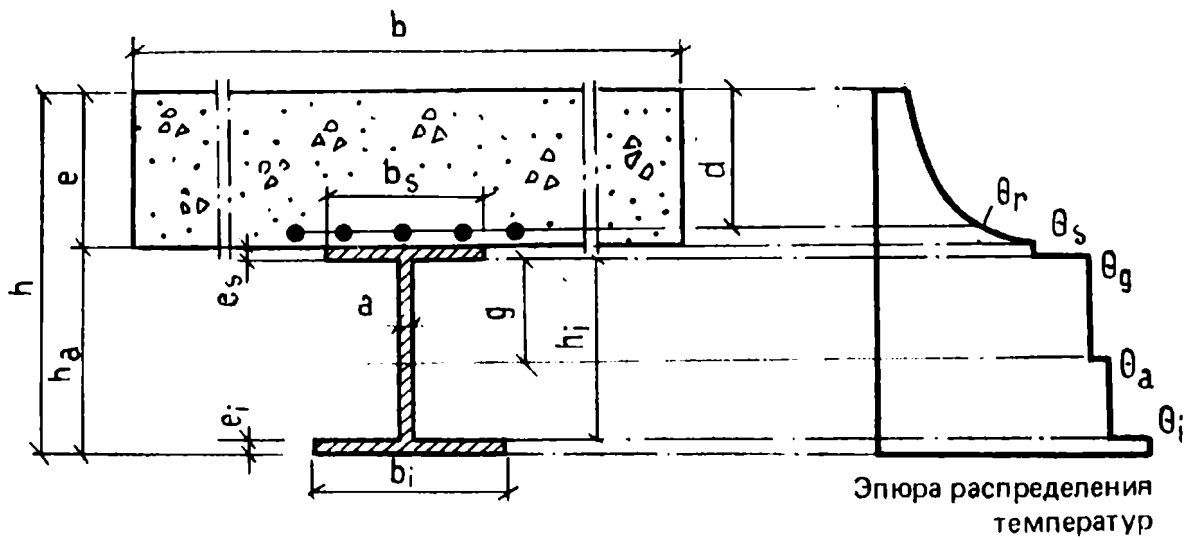


РИС. 5.22

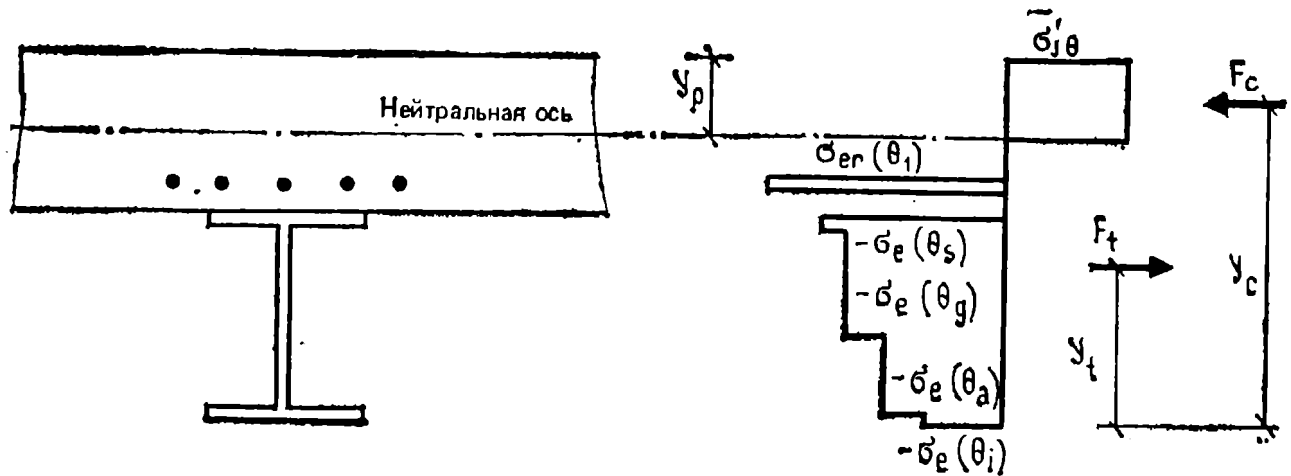


РИС. 5.23

Положение нейтральной оси таково, что сжимающая сила в бетоне  $F_b$  уравновешивается растягивающим усилием в арматуре  $F_t$ , т. е.

$$F_t = \overline{\sigma'_{j\theta}} b y_p = F_c, \quad (5.69)$$

откуда

$$y_p = F_t / (\overline{\sigma'_{j\theta}} b). \quad (5.70)$$

Точки приложения сил  $F_t$  и  $F_c$  определяются расстояниями  $y_t$  и  $y_c$  от нижней поверхности профиля, которые можно найти из выражений

$$y_c = h - y_p / 2; \quad (5.71)$$

$$y_t = \frac{1}{F_t} \left[ \frac{e_i}{2} b_i \sigma_e(\theta_i) + a (h_1 - g) \sigma_e(\theta_a) \left( e_i + \frac{h_1 - g}{2} \right) + a g \sigma_e(\theta_g) \times \right. \\ \left. \times \left( e_i + h - \frac{g}{2} \right) + e_s b_s \sigma_e(\theta_s) \left( h_a - \frac{e_s}{2} \right) + S_1 \sigma_{er}(\theta_r) (h - d) \right], \quad (5.72)$$

откуда находим плечо  $z$ :

$$z = y_c - y_t \quad (5.73)$$

и, наконец, пластический момент

$$M_p(\theta) = z F_t. \quad (5.74)$$

В этом выражении  $\theta$  означает переменное температурное поле в комплексной балке.

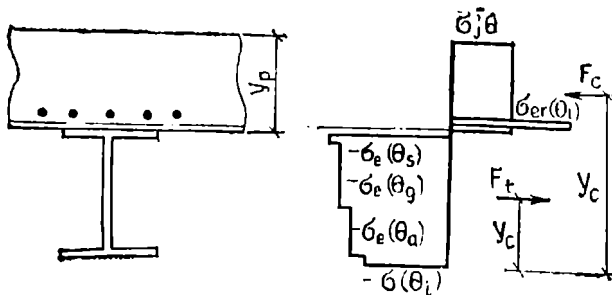


РИС. 5.24

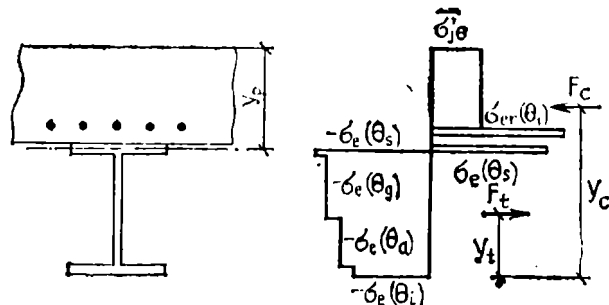


РИС. 5.25

2.2. Нейтральная ось расположена в бетоне ниже арматуры. При этом выполняется неравенство

$$F_t = e_i b_i \sigma_e(\theta_i) + a(h_1 - g) \sigma_e(\theta_a) + ag \sigma_e(\theta_g) + e_s b_s \sigma_e(\theta_s) \leq \bar{\sigma}'_{j\theta} b e + S_1 \sigma_{er}(\theta_r); \quad (5.75)$$

$$y_p = F_t - S_1 \sigma_{er}(\theta_r) / (b \bar{\sigma}'_{j\theta}); \quad (5.76)$$

$$y_c = \frac{1}{F_t} \left[ \bar{\sigma}'_{j\theta} b y_p \left( h - \frac{y_p}{2} \right) + S_1 \sigma_{er}(\theta_r) (h - d) \right]; \quad (5.77)$$

$$y_t = \frac{1}{F_t} \left[ \frac{e_i^2}{2} b_i \sigma_e(\theta_i) + a(h_1 - g) \sigma_e(\theta_a) \left( e_i + \frac{h_1 - g}{2} \right) + ag \sigma_e(\theta_g) \times \right. \\ \left. \times \left( e_i + h_1 - \frac{g}{2} \right) + e_s b_s \sigma_e(\theta_s) \left( h_a - \frac{e_s}{2} \right) \right]. \quad (5.78)$$

Затем с помощью формул (5.73) и (5.74) можно вычислить пластический момент. Если арматура расположена в непосредственной близости от нейтральной оси, то в формулах (5.76) — (5.78) можно пренебречь величиной  $S_1$ .

2.3. Нейтральная ось расположена в верхней полке профиля. При этом выполняется неравенство

$$F = e_i b_i \sigma_e(\theta_i) + a(h_1 - g) \sigma_e(\theta_a) + ag \sigma_e(\theta_g) \leq \bar{\sigma}'_{j\theta} b e + S_1 \sigma_{er}(\theta_r) + e_s b_s \sigma_e(\theta_s); \quad (5.79)$$

$$y_p = \frac{1}{2 b_s \sigma_e(\theta_s)} \left[ F + (e_s + 2) b_s \sigma_e(\theta_s) - \bar{\sigma}'_{j\theta} b e - S_1 \sigma_{er}(\theta_r) \right]; \quad (5.80)$$

$$F_t = F_c = F + (e_s - y_p + e) b_s \sigma_e(\theta_s); \quad (5.81)$$

$$y_c = \frac{1}{F_t} \left[ \bar{\sigma}'_{j\theta} b e \left( h - \frac{e}{2} \right) + S_1 \sigma_{er}(\theta_r) (h - d) + (y_p - e) b_s \sigma_e(\theta_s) \left( h - \frac{e}{2} - \frac{y_p}{2} \right) \right]; \quad (5.82)$$

$$y_t = \frac{1}{F_t} \left[ \frac{e_i^2}{2} b_i \sigma_e(\theta_i) + a(h_1 - g) \sigma_e(\theta_a) \left( e_i + \frac{h_1 - g}{2} \right) + ag \sigma_e(\theta_g) \times \right. \\ \left. \times \left( e_i + h_1 - \frac{g}{2} \right) + (e_s + e - y_p) b_s \sigma_e(\theta_s) \left( h - \frac{y_p + e_s + e}{2} \right) \right]. \quad (5.83)$$

Пластический момент определим по формулам (5.73) и (5.74). Здесь также можно пренебречь арматурой, если она расположена вблизи нейтральной оси.

2.4. Нейтральная ось расположена в части стенки, имеющей температуру  $\theta_g$ . При этом выполняется неравенство

$$F = e_i b_i \sigma_e(\theta_i) + a(h_1 - g) \sigma_e(\theta_a) \leq \bar{\sigma}'_{j\theta} be + S_1 \sigma_{er}(\theta_r) + e_s b_s \sigma_e(\theta_s) + ag \sigma_e(\theta_g); \quad (5.84)$$

$$y_p = \frac{1}{2a\sigma_e(\theta_g)} \left[ F + (g + 2e + 2e_s) a \sigma_e(\theta_g) - \bar{\sigma}'_{j\theta} be - S_1 \sigma_{er}(\theta_r) - e_s b_s \sigma_e(\theta_s) \right]; \quad (5.85)$$

$$F_t = F_c = F + (g + e + e_s - y_p) a \sigma_e(\theta_g); \quad (5.86)$$

$$y_c = \frac{1}{F_t} \left[ \bar{\sigma}'_{j\theta} be \left( h - \frac{e}{2} \right) + S_1 \sigma_{er}(\theta_r) (h - d) + a_s b_s \sigma_e(\theta_s) \left( h_a - \frac{e_s}{2} \right) + (y_p - e - e_s) a \sigma_e(\theta_g) \left( h - \frac{y_p + e + e_s}{2} \right) \right]; \quad (5.87)$$

$$y_t = \frac{1}{F_t} \left[ \frac{e_i^2}{2} b_i \sigma_e(\theta_i) + a(h_1 - g) \sigma_e(\theta_a) \times \left( e_i + \frac{h_1 - g}{2} \right) + (g - y_p + e + e_s) a \sigma_e(\theta_g) \times \left( e_i + h_1 - \frac{g + y_p - e - e_s}{2} \right) \right]. \quad (5.88)$$

Дальнейшие вычисления ведутся по формулам (5.73) и (5.74).

2.5. Нейтральная ось расположена в части стенки, имеющей температуру  $\theta_a$ . При этом выполняется неравенство

$$F = e_i b_i \sigma_e(\theta_i) \leq \bar{\sigma}'_{j\theta} be + S_1 \sigma_{er}(\theta_r) + e_s b_s \sigma_e(\theta_s) + ag \sigma_e(\theta_g) + a(h_1 - g) \sigma_e(\theta_a); \quad (5.89)$$

$$y_p = \frac{1}{2a\sigma_e(\theta_a)} \left[ F + (h_1 + g + 2e + 2e_s) a \sigma_e(\theta_a) - \bar{\sigma}'_{j\theta} be - S_1 \sigma_{er}(\theta_r) - e_s b_s \sigma_e(\theta_s) - ag \sigma_e(\theta_g) \right]; \quad (5.90)$$

$$F_t = F_c = F + (h_1 + e + e_s - y_p) a \sigma_e(\theta_a); \quad (5.91)$$

$$y_c = \frac{1}{F_t} \left[ \bar{\sigma}'_{j\theta} be \left( h - \frac{e}{2} \right) + S_1 \sigma_{er}(\theta_r) (h - d) + e_s b_s \sigma_e(\theta_s) \left( h_a - \frac{e_s}{2} \right) + ga \sigma_e(\theta_g) \left( h_a - e_s - \frac{g}{2} \right) + (y_p - g - e - e_s) a \sigma_e(\theta_a) \left( h - \frac{y_p + g + e + e_s}{2} \right) \right]; \quad (5.92)$$

$$y_t = \frac{1}{F_t} \left[ \frac{e_i^2}{2} b_i \sigma_e(\theta_i) + a(h_1 - y_p + e + e_s) \sigma_e(\theta_a) \times \left( e_i + \frac{h_1 - y_p + e + e_s}{2} \right) \right]. \quad (5.93)$$

Пластический момент также определяется по формулам (5.73) и (5.74).

3. Применение метода. Все фигурирующие здесь температуры следует определять в соответствии с указаниями гл. 5. Вычисление среднего значения прочности бетона при сжатии  $\bar{\sigma}'_{j\theta}$  не представляет трудности. Здесь применяют два

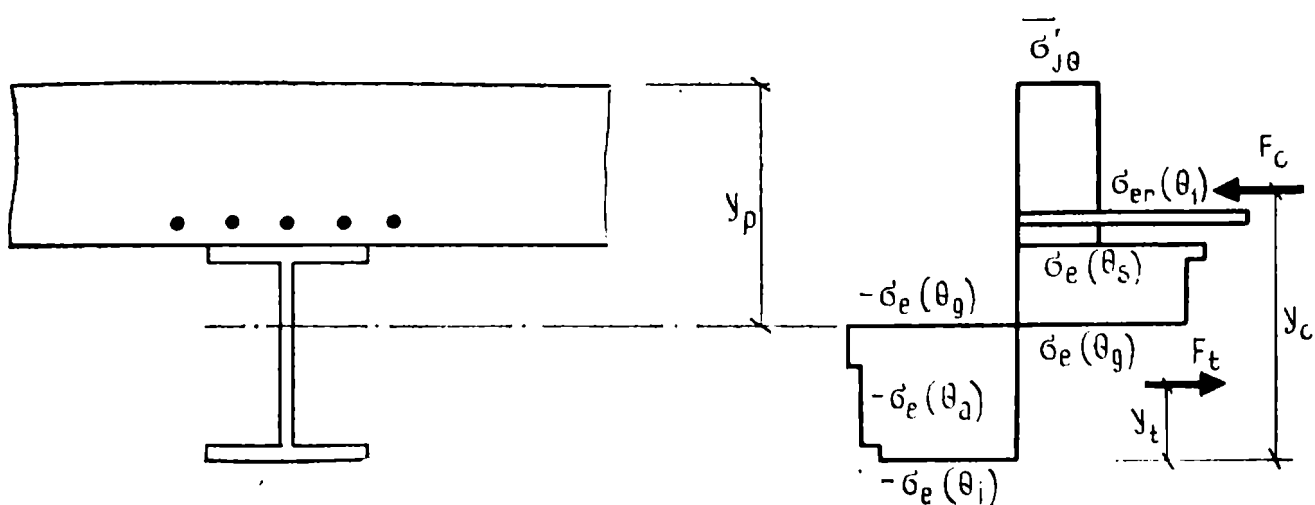


РИС. 5.26

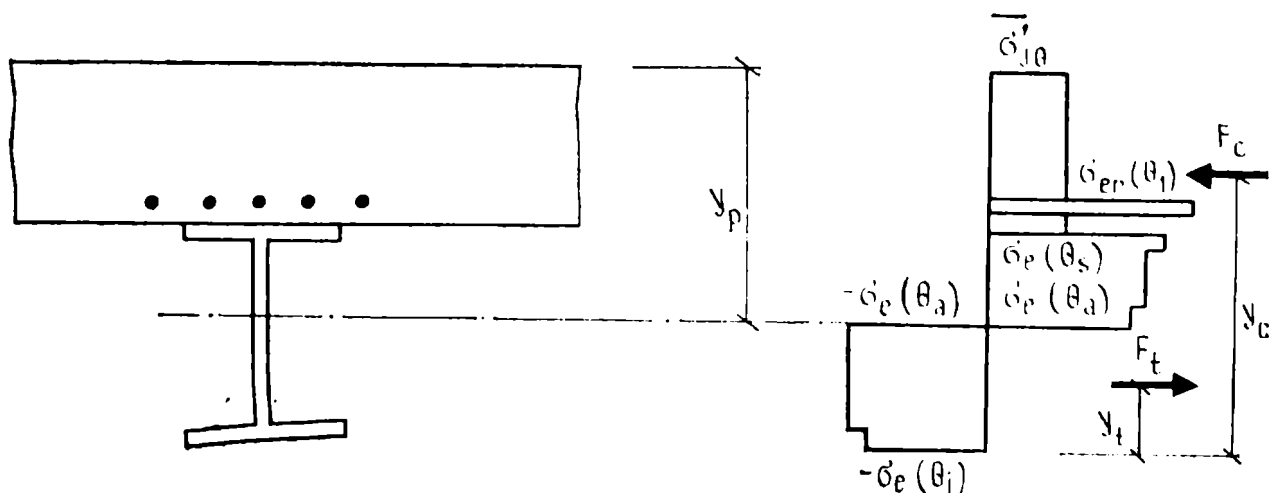


РИС. 5.27

основных варианта:

нейтральная ось расположена выше арматуры плиты; при этом температура бетона обычно не превышает  $250^\circ\text{C}$ , и, следовательно, можно принять значение  $\bar{\sigma}'_{j\theta}$  для нормальной температуры, т.е.  $\bar{\sigma}'_{j\theta} = \sigma'$ ;

нейтральная ось расположена ниже арматуры (в бетоне или в металлическом профиле); при этом не будет допущена сколь-нибудь значительная ошибка, если принять  $\bar{\sigma}'_{j\theta}$  в качестве средней величины по всей толщине плиты.

Такую формулировку можно применить только к бетону и только к стальному профилю. В первом случае необходимо использовать формулы разд. 2.1, в которых поверхность профиля принимается равной нулю, а во втором случае следует применять формулы разд. 2.3—2.5.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [5.1] COMETUBE. — *Stabilité au feu des profils creux en acier de construction*. Rapport final déc. 76/36-15A, nov. 76.
- [5.2] J. Brozzetti, A. Bah et A. Fulop. — *La résistance au feu des planchers mixtes collaborants*. C.T.I.C.M. doc. n° 1009-2, déc. 75.
- [5.3] P. Arnault, H. Ehm, et J. Kruppa. — *Résistance au feu des poutres mixtes (isostatiques et hyperstatiques)*. C.T.I.C.M. doc n° 2 10 20—4, février 1976.
- [5.4.] C.T.I.C.M. — *Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en acier*. D. T. U. revue Construction Métallique, déc. 76.
- [5.5] *Méthode de prévision par le calcul du comportement au feu des structures en béton*. — D.T.U. cahiers du CSTB. 1. 153, cah. 1270, octobre 1974.
- [5.6] G. Grandjean. — *Étude de la tenue au feu de profils creux carrés remplis de béton*. École Nationale des Ponts et Chaussées, juillet 75.

[5.7] CRIF—COMETUBE. — *Profils creux remplis de béton*. Méthode de calcul. Notice 1060, novembre 1976.

[5.8] G. Grandjean, C. Lelong. — *Tenue au feu de profils creux carrés remplis de béton*. Annales ITBTP n° 347, février 77.

[5.9] C.T.I.C.M. — *Calcul des planchers mixtes acier-béton*. Recommandations. Revue Construction Métallique, n° 3, 1965.

[5.10] J. C. Badoux, P. Burkhardt et P. Schmalz. — *Poutres mixtes dans le bâtiment*. Centre suisse de la Construction métallique. Zurich, avril 1971.

[5.11] L. Twilt. — *Orientational model scale testes on the behaviour of fire exposed simply supported steel and concrete composite beams*. Institut TNO. Pays-Bas, report n° BI 7591, mars 1976.

[5.12] M. Bonetti, J. Kruppa. — *Résistance au feu des poutres mixtes*. Stage de perfectionnement technique, décembre 1974. C.T.I.C.M.

[5.13] Brochure 1011. — *Sécurité contre l'incendie*. Journaux Officiels. Paris.

[5.14] G. Lamboley, B. Barthélémy. — *Recueil d'essais de planchers béton avec bacs en acier*. C.T.I.C.M., août 1977, Rapport n° 1009-3.

## Глава 6. ОГНЕСТОЙКОСТЬ ДЕРЕВЯННЫХ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

### 6.1. ВВЕДЕНИЕ

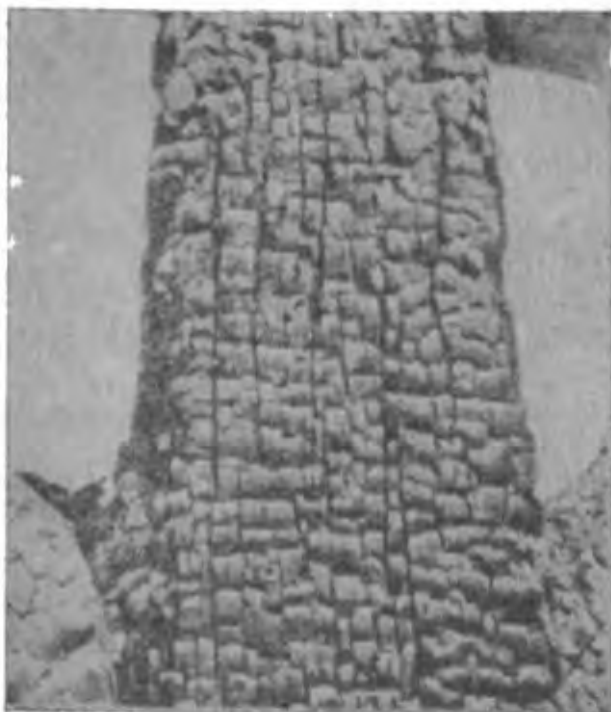
Дерево является воспламеняемым и горючим материалом и, следовательно, можно ожидать, что оно характеризуется невысокой огнестойкостью, однако это не так. Во время пожара на поверхности деревянного элемента образуется обуглившийся слой, который защищает нижележащие слои древесины от воздействия огня (рис. 6.1). Таким образом, эффективное сечение деревянной балки или колонны при пожаре уменьшается достаточно медленно, в связи с чем деревянный каркас теряет свою несущую способность в течение продолжительного времени и обычно достаточно долго сохраняет свою прочность. Это обеспечивает необходимое время для эффективного вмешательства пожарных.

Тем не менее при сгорании древесины выделяется большое количество тепла, которое может достигать  $25\,000\text{ ккал}/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$ .

При этом следует отметить, что под действием тепла древесина не подвергается ни расширению, ни усадке и ее термические деформации не влекут за собой опасности для каркаса в целом.

Отметим также, что хотя общий вид деревянной конструкции после пожара куда менее удручающий (рис. 6.2), чем стального каркаса в результате воздействия огня, этот факт не является объективным критерием оценки высокой огнестойкости древесины, поскольку чрезвычайно важный фактор времени никак не отражается на окончательном внешнем виде пострадавшей конструкции (см. разд. 1.2).

Деревянные конструкции хорошо сопротивляются воздействию огня и, кроме того, способствуют увеличению теплового потенциала, проявляющегося лишь на стадии полного развития пожара. Деревянные



**РИС. 6.1. ОБЩИЙ ВИД ЭЛЕМЕНТА ДЕРЕВЯННОЙ КОНСТРУКЦИИ ПОСЛЕ ПОЖАРА. ДРЕВЕСИНА ОБУГЛЕНА СНАРУЖИ, А ПОВРЕЖДЕНИЯ В БОЛЕЕ ГЛУБОКИХ СЛОЯХ НЕЗНАЧИТЕЛЬНЫ. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ СЕЧЕНИЯ ОКАЗАЛАСЬ ЗАЩИЩЕННОЙ ВНЕШНИМ ОБУГЛЕННЫМ СЛОЕМ**



**РИС. 6.2. ОБЩИЙ ВИД КНИЖНОГО СКЛАДА ПОСЛЕ ПОЖАРА. СКЛАД БЫЛ ПЕРЕКРЫТ ЧАСТИЧНО ДЕРЕВЯННОЙ, ЧАСТИЧНО СТАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИЕЙ. ДЕРЕВЯННЫЙ КАРКАС (СПРАВА) ВЫСТОЯЛ, В ТО ВРЕМЯ КАК СТАЛЬНОЙ КАРКАС ОБРУШИЛСЯ [6.3]**

конструкции, как и конструкции из других материалов, обладают своими достоинствами и недостатками, которые следует тщательно учитывать при проектировании.

## **6.2. ПОВЕДЕНИЕ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ДЕЙСТВИИ ОГНЯ**

Поскольку в данном разделе представлены лишь некоторые общие сведения о воспламеняемости и горючести древесины, в поисках более исчерпывающей информации читатель может обратиться к работам [6.1] и [6.2].

**6.2.1. Воспламеняемость древесины.** Она зависит от большого числа факторов, характеризующих как сам материал, так и источник тепла, например температура материала является функцией теплового потока. Для каждого конструктивного решения с применением деревянных элементов существует минимальное количество тепла, способное вызвать перегонку горючих газов и воспламенение древесины. Малая теплопроводность древесины вызывает плохой отвод тепла, в связи с чем ее температура быстро возрастает в месте подвода тепла и возникает опасность воспламенения.

Воспламеняемость древесины зависит от породы дерева, состояния поверхности изделия, способа обработки и влажности древесины. Древесина более твердая и плотная горит хуже, чем более мягкая и легкая той же породы, а ее горючесть снижается с ростом относительной

**Т а б л и ц а 6.1. Характеристика процесса разложения древесины при нагреве и горении (по Э. Жоану)**

| Температура в печи, °С                                     | 150—<br>200 | 200—280 | 280—380 | 380—500 | 500—700 | 700—900 |
|------------------------------------------------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Процентное содержание углерода в древесном угле            | 60          | 68      | 78      | 84      | 89      | 91      |
| Процентный состав не-конденсируемых газов по объему        |             |         |         |         |         |         |
| CO <sub>2</sub>                                            | 68          | 66,5    | 35,5    | 31,5    | 12,2    | 0,4     |
| CO                                                         | 30,5        | 30      | 20,5    | 12,3    | 24,5    | 9,6     |
| водород                                                    | 0           | 0,2     | 5,5     | 7,5     | 42,7    | 80,7    |
| углеводороды                                               | 2           | 3, 3    | 36,5    | 48,7    | 20,4    | 8,8     |
| Теплопроводная способ-<br>ность 1 м <sup>3</sup> газа, кал | 1100        | 1210    | 3920    | 4780    | 3630    | 3160    |

влажности. Известно, что небольшой кусок дерева с шероховатой поверхностью и острыми углами горит лучше, чем мощная гладкая балка с закругленными углами.

#### **6.2.2. Сгораемость древесины.**

**6.2.2.1. Природа и температура газов, образующихся при сгорании древесины.** Поскольку горение представляет собой реакцию окисления, или присоединения кислорода, оно происходит при любой температуре, а увеличение скорости горения растет с повышением температуры окружающей среды. Изучение горения древесины (см. табл. 6.1) показывает, что при температуре 280 °С природа образующихся при этом газов полностью меняется, поскольку вследствие разложения клетчатки и лигнина резко повышается процентное содержание углеводородов и водорода.

Температуру выделяемых при горении газов определить довольно трудно, однако известно, что она всегда выше 1000 °С, а в определенных условиях может достигать 1850 °С.

**6.2.2.2. Химические реакции при горении [6.2].** Начиная с температуры 280 °С разложение древесины становится особенно быстрым, в высшей степени экзотермическим процессом и при этом выделяется значительное количество газов, большая часть которых является горючими. При горении этих газов образуется пламя, нагревающее новые объемы древесины и способствующее постепенному расширению процесса горения. Вследствие высокой температуры продукты разложения вступают в новые реакции между собой и вновь подвергаются разложению. Водяной пар либо выделяется в окружающий воздух, либо встречается на своем пути раскаленный уголь, который разлагает его с образованием окиси углерода CO и водорода H; эти компоненты также горят, образуя так называемый газ с водой. Равновесие между всеми реакциями, происходящими при сгорании древесины, в значительной

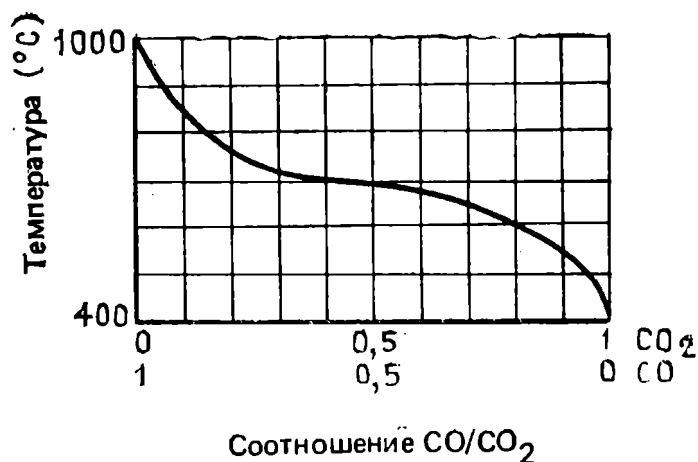


РИС. 6.3

(реакция между  $\text{CO}_2$  и избыточным углем — эндотермическая фаза: зона восстановления).

На рис. 6.3 показана кривая равновесия между  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  в присутствии угля при нормальном давлении. Отсюда видно, что при реакции (II) выделение  $\text{CO}$  может начаться только при температуре выше  $400^\circ\text{C}$  и становится практически полным при температуре выше  $1000^\circ\text{C}$ .

«Тощий» газ представляет собой газ, образующийся при сгорании угля в присутствии значительного избытка горючего:  $2\text{C} + \text{O}_2 + 4\text{N}_2 \rightarrow 2\text{CO} + 4\text{N}_2 - 48 \text{ кал}$ .

При воздействии водяного пара на раскаленный уголь происходят две одновременные реакции:  $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2 - 28 \text{ кал}$  и  $\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + 2\text{H}_2 - 18 \text{ кал}$ , которые к тому же сочетаются еще с двумя реакциями:  $\text{CO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons 2\text{CO} - 39 \text{ кал}$  и  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2 - 10 \text{ кал}$ .

В результате получается «газ с водой», который практически представляет собой смесь  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ .

При температуре, превышающей  $1000^\circ\text{C}$ , эта смесь содержит лишь  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ , а при температуре  $750^\circ\text{C}$  она содержит:  $\text{CO} - 30\%$ ,  $\text{CO}_2 - 37\%$ ,  $\text{H}_2 - 24\%$ ,  $\text{H}_2\text{O} - 9\%$ .

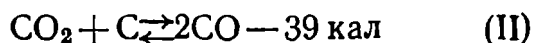
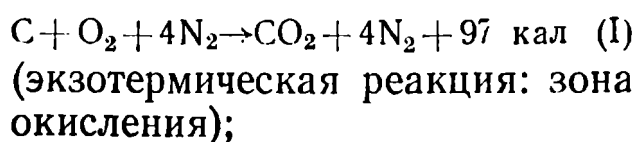
Остаточным продуктом после выделения газов является древесный уголь; при горении дерева его образование происходит постепенно с поверхности внутрь материала, пока температура его остается выше  $275^\circ\text{C}$ . Древесный уголь, образующийся при температуре  $275-350^\circ\text{C}$ , загорается на воздухе при температуре  $340-370^\circ\text{C}$ . Если температура оказывается достаточной для его возгорания, то он дает при этом часть тепла, необходимую для дальнейшего горения.

**6.2.2.3. Теплотворная способность древесины.** Величина ее является относительно постоянной независимо от породы дерева. В результате испытаний сухих образцов в сосуде Малера [6.2] получены следующие данные, показывающие возможную максимальную теплотворную способность в зависимости от породы дерева: тополь — 4378, дуб — 4551, сосна обыкновенная — 4556, бук — 4579, пихта — 4589, ель — 4608, дуб скальный (зимний) — 4622, ясень — 4662, ольха — 4715, каштан — 4734, береза — 4802, сосна приморская — 4849, граб — 4927 кал/г.

Древесина всегда является гидратированной вследствие наличия воды насыщения в волокнах клетчатки, а также конституционной воды молекул клетчатки. Эта влага существенным образом снижает

мере зависит от температурных условий, количества кислорода и других факторов.

При этом имеют место следующие основные химические реакции, происходящие одновременно:



теплотворную способность древесины. Так, действительная теплотворная способность 1 кг древесины, содержащей 10% воды, равна теплотворной способности 909 г сухой древесины, уменьшенной на удельную теплоемкость 91 г воды (нагретой до 100 °С), на теплоту парообразования этой воды и на удельную теплоемкость 91 г водяного пара при температуре между 100 °С и температурой окружающей среды.

### 6.3. МАТЕРИАЛЫ И СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ДРЕВЕСИНЫ

**6.3.1. Целесообразность огнезащиты древесины.** В общем случае можно обеспечить достаточный предел огнестойкости деревянного каркаса путем некоторого увеличения сечений его элементов (см. разд. 6.4). Нанесение наружных защитных покрытий является неудобным решением, за исключением случаев, когда требуется достаточно высокое значение предела огнестойкости. Кроме того, с учетом изменчивости содержания влаги в древесине следует опасаться изменений размеров сечений деревянных элементов, которые могут нарушить целостность и стойкость защитных покрытий. Наконец, следует помнить, что все способы придания древесине огнестойкости улучшают лишь ее сопротивление воздействию огня, отнюдь не повышая ее прочности, т.е. они ограничивают опасность возгорания, но не замедляют начавшийся процесс горения. Данные о способах повышения огнестойкости древесины можно найти в работе [6.2], а также в приложении к настоящей главе.

**6.3.2. Защита гипсом.** Хотя для защиты древесины можно использовать те же материалы, что и при огнезащите стальных конструкций (разд. 4.2.1), на практике часто применяют гипс, являющийся единственным материалом, стоимость которого не превышает стоимости увеличения сечений элементов деревянной конструкции. Однако независимо от того, в каком виде применяется гипс (в виде плиток или штукатурки), основная трудность заключается в обеспечении его качественного сцепления с древесиной вследствие происходящих в ней гигроскопических изменений. Прочность сцепления гипсовой штукатурки с древесиной повышают путем добавок кварцевого песка в гипсовый раствор и путем забивки в деревянную поверхность гвоздей с широкими шляпками. В случае применения гипсовых плиток следует учитывать образование тепловых мостиков, которыми являются гвозди или винты: их шляпки или головки быстро нагреваются, передавая тепло древесине. При этом древесина обезвоживается или обугливается, что приводит к преждевременному отставанию и обрушению плиток (рис. 6.4).

**6.3.3. Меры предосторожности при применении деревянных конструкций.** Несмотря на применение каких-либо способов защиты, дере-

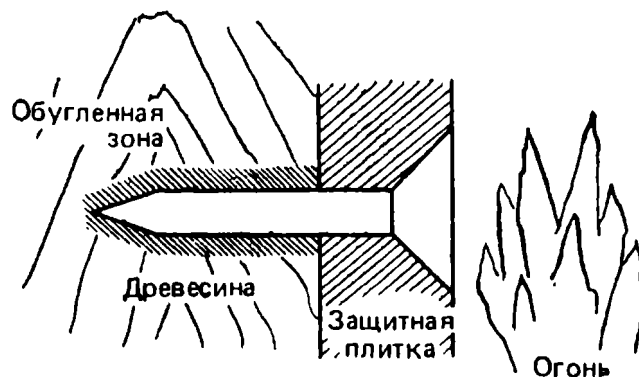


РИС. 6.4

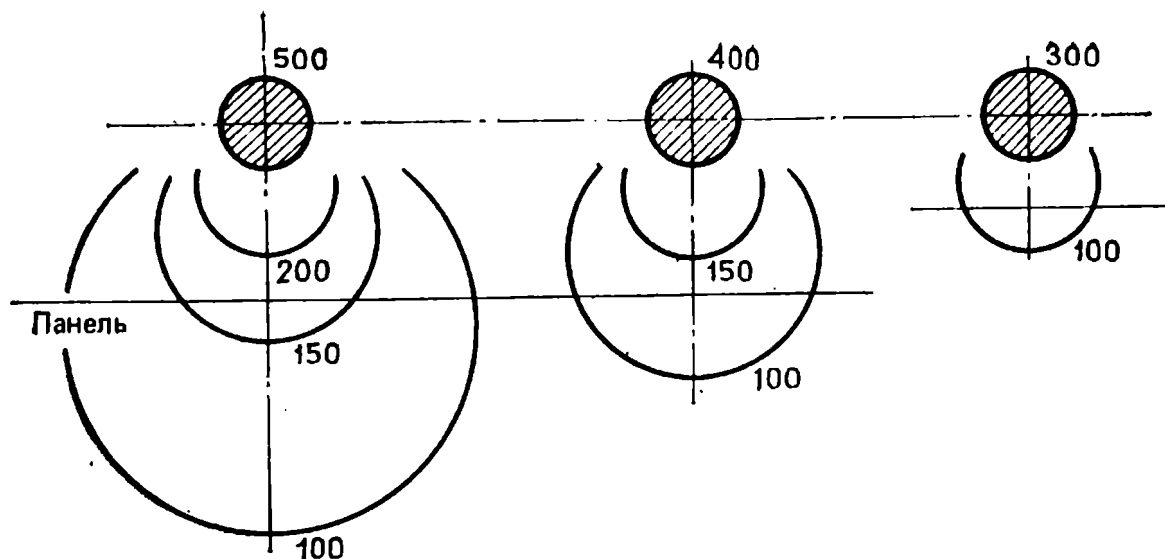


РИС. 6.5

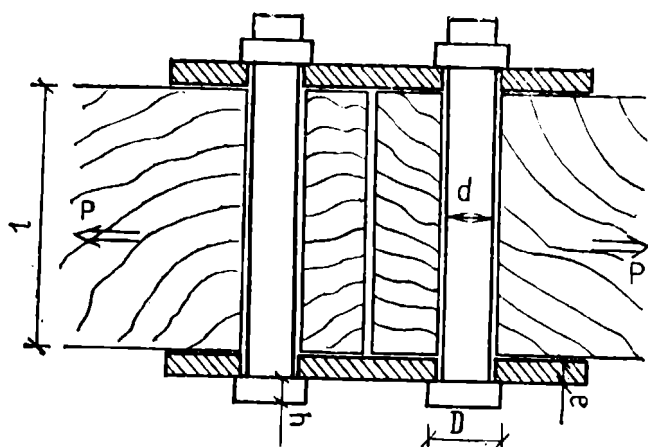


РИС. 6.6

во является материалом, использование которого требует соблюдения определенных правил при проектировании и эксплуатации.

Прежде всего следует избегать применения элементов, геометрические особенности и состояние поверхности которых благоприятствуют возгоранию. Для этого необходимо стремиться к устранению острых кромок, к уменьшению от-

ношения поверхности элемента к его объему, а также предусматривать шлифовку поверхностей.

Всякий раз, когда в расчет входят экономические соображения, следует предпочитать древесину твердых пород (ясень, граб, дуб или каштан).

**6.3.3.1. Тепловое излучение.** Поскольку значительное количество пожаров обусловлено возгоранием деревянных элементов или изделий, находившихся под непосредственным воздействием теплового излучения или нагрева путем передачи тепла теплопроводностью от естественных (природных) источников тепла, необходимо располагать их как можно дальше один от другого. В качестве примера на рис. 6.5 приведены изотермы температуры в деревянной панели, расположенной вблизи нагревательной трубы, имеющей температуру 300, 400 и 500 °C [6.2].

**6.3.3.2. Характеристика клеев [6.3].** В Техническом центре лесной и деревообрабатывающей промышленности (СТВ или ЦТБ) в Париже проведены испытания деревянных клееных балок на действие огня в течение 35 мин с целью сравнения свойств различных клеев.

На основе этих экспериментов можно отметить, что резорциновые клеи характеризуются в этих условиях более высокими свойствами, чем мочевиноформальдегидные и казеиновые.

Из клееных деревянных рам, подвергнутых сильному воздействию

огня (кальцинация древесины на глубину 2—3 см по контуру сечения элементов), были вырезаны образцы для испытания на растяжение перпендикулярно плоскости склеивания. В результате испытаний было установлено; разрушение образцов происходит по древесине, а не по плоскости склеивания; зона, расположенная на границе обуглившейся части, имеет несколько менее высокую прочность ( $17,3 \text{ кгс/см}^2$ ), чем зона в центре сечения балки ( $21,5 \text{ кгс/см}^2$ ), т.е. снижение прочности составляет около 25%.

**6.3.3.3. Поведение металлических соединительных элементов.** Для соединения элементов деревянного каркаса часто применяют механические соединения [6.4], предусматривающие использование накладок, болтов, штырей и пр. При воздействии огня на такие элементы возникают две проблемы. Первая из них состоит в том, что они образуют тепловые мостики, которые приводят к нарушению сцепления соединительного элемента с деревом за счет его поверхностного обугливания (см. рис. 6.4). Вторая проблема заключается в разрушении самого соединительного элемента. Для предотвращения обоих явлений обычно используют конструктивные решения, при которых металл не подвергается воздействию огня непосредственно: размещение стальных деталей внутри клееной древесины, применение утопленных в дерево и закрытых пробками болтов, нанесение штукатурных слоев (гипсовых и пр.). Если применение таких приемов не представляется возможным, то используют достаточно массивные металлические детали, нагрев которых происходит более медленно. Так, для основных элементов (шарниры, стыки, анкеры) можно рекомендовать листовую сталь толщиной не менее 6 мм, а для второстепенных — не менее 3 мм [6.3].

При использовании некоторых вариантов можно рассчитать эти детали с помощью методов, применяемых для расчета металлических конструкций (гл. 4).

**П р и м е р.** Требуется рассчитать огнестойкость соединения на накладках из листовой стали (рис. 6.6). Для расчета нагрева будем считать, что болты имеют цилиндрические головки высотой  $h$  и диаметром  $D$ . Кроме того, необходимо учесть продольный температурный градиент в стержне болта, который можно получить лишь из решения уравнения Фурье. Для простоты предположим, что зона влияния температуры под головкой болта распространяется на длину  $2D$  и что температура в ней однородна.

С использованием этих гипотез расчет ведется следующим образом:

а) расчет болта:

$$\frac{S}{V} = \frac{\pi D^2/4 + \pi D h}{(\pi D^2/4) h + (\pi d^2/4) 2D} = \frac{D + 4h}{D h + d^2}.$$

В табл. 4.1 (гл. 4) указаны температуры, достигаемые в зоне нагрева в зависимости от времени. Теперь нам следует убедиться, что температура, достигаемая в течение требуемого пределом огнестойкости времени, не превышает критической температуры болта, определяемой по более жесткому из двух критериев: обугливание древесины вблизи болта, потеря механической прочности болта.

С учетом указаний разд. 6.2.2.1 примем, что при температуре 280 °С обугливания древесины (критерий 1) не происходит. Эта температура значительно ниже той, которую можно было бы получить по критерию 2 из следующего отношения:  $\sigma/\sigma_u$ , где  $\sigma$  — максимальное эффективное напряжение и  $\sigma_u$  — предельное напряжение в болте (для упрощения  $\sigma = \sigma_e$ ). Температура разрушения указана на рис. 4.22;

б) расчет накладки:  $S/V \approx 1/e$ .

По полученному коэффициенту массивности с помощью табл. 4.1 можно определить температуру, достигаемую в накладке в течение требуемого пределом огнестойкости времени. Далее остается лишь сравнить ее с температурой разрушения, полученной с учетом соотношения  $\sigma/\sigma_u$ , и кривой, приведенной на рис. 4.22.

#### 6.4. ПРОГНОЗ ОГНЕСТОЙКОСТИ НЕЗАЩИЩЕННЫХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Если элемент деревянного каркаса подвержен воздействию огня, то на его поверхности образуется обугленный слой, толщина которого увеличивается с течением времени в зависимости от плотности и гигроскопического состояния древесины, а также от длительности действия огня. Поскольку такой обугленный слой не обладает механической прочностью, несущая способность элемента уменьшается по мере увеличения глубины обугливания. Кроме того, центральная (необугленная) часть сечения элемента также частично теряет свою прочность вследствие нагрева.

Таким образом, для расчета огнестойкости элемента деревянного каркаса необходимо знать: скорость проникания обугливания в глубь сечения, распределение температуры в необугленной зоне сечения и изменение механических свойств древесины (прочности и деформативности) в зависимости от температуры.

Скорость обугливания можно определять по номограмме (рис. 6.7) в зависимости от плотности древесины и ее относительной влажности [6.4]. Номограмма разработана на базе испытаний, проводившихся в условиях стандартного пожара (см. разд. 2.6). Поэтому ею можно пользоваться лишь в случаях, когда зависимость температура — время — сходна с аналогичной кривой ИСО. Для менее точных расчетов можно принять: для легкой и сухой древесины 0,08 см/мин, для плотной и влажной древесины 0,04 см/мин, в среднем 0,06 см/мин. Кроме того, радиус закругления между двумя смежными обугленными взаимно перпендикулярными поверхностями составляет около 3 см.

Два других параметра из числа указанных выше получить весьма затруднительно, поскольку нам неизвестны физико-химические явления в необугленной зоне и, в частности, перемещение влаги. Наконец, очень трудной задачей является экспериментальное измерение теплофизических и механических свойств древесины при высокой температуре.

В отсутствие более надежных данных в расчет закладывают величины, которые можно найти из графиков, приведенных на рис. 6.8—6.10 [6.5].

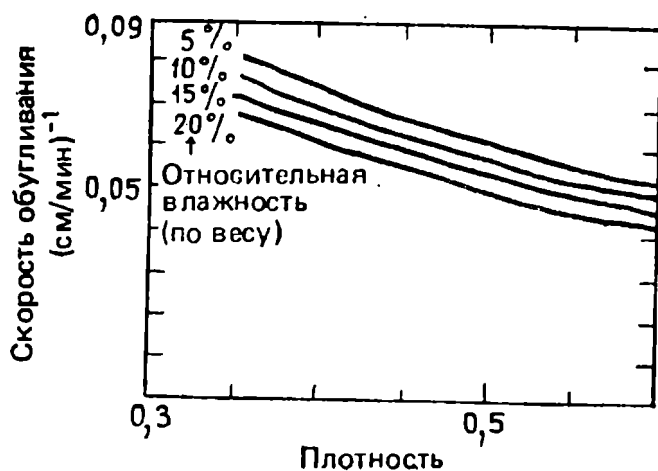


РИС. 6.7

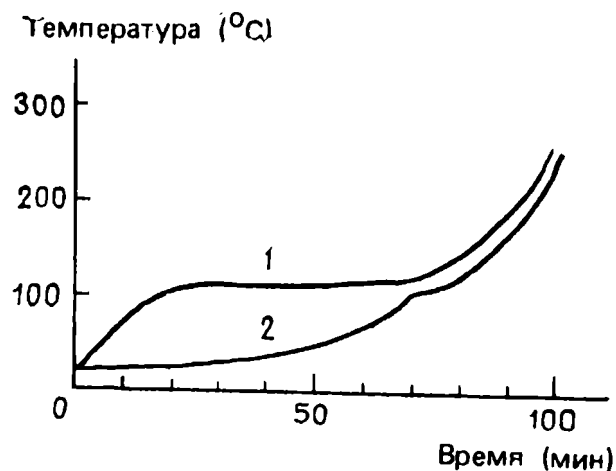


РИС. 6.8. ИЗМЕНЕНИЕ ВО ВРЕМЕНИ ТЕМПЕРАТУРЫ КЛЕНОЙ ДРЕВЕСИНЫ НЕПОСРЕДСТВЕННО ПОД ОБУГЛЕННЫМ СЛОЕМ (КРИВАЯ 1) И В ЦЕНТРЕ СЕЧЕНИЯ (КРИВАЯ 2)

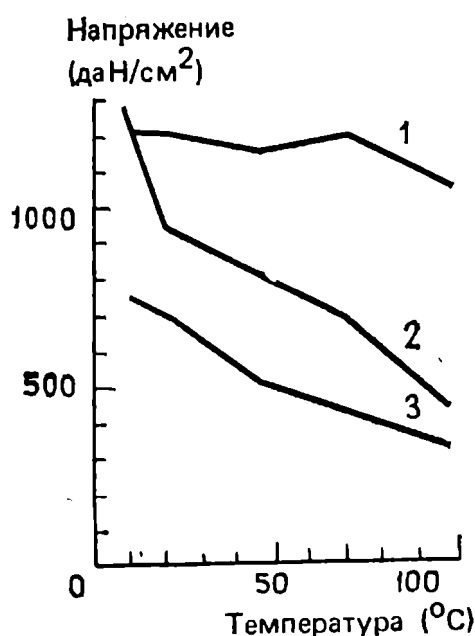


РИС. 6.9. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОЧНОСТЬ ДРЕВЕСИНЫ ЕЛИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ (КРИВАЯ 1), ИЗГИБЕ (КРИВАЯ 2) И СЖАТИИ (КРИВАЯ 3)

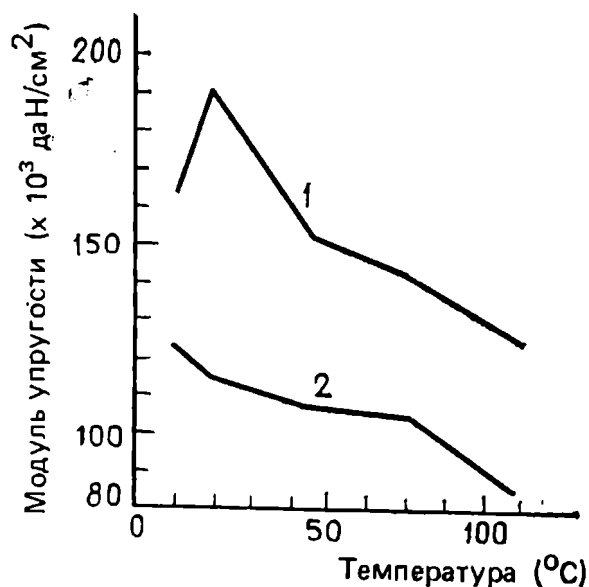


РИС. 6.10. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЕЛИЧИНУ МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ПРИ ИЗГИБЕ И СЖАТИИ  
1 — сжатие; 2 — изгиб

Температурное расширение древесины очень незначительно (примерно в 200 раз меньше, чем набухание от увеличения ее влажности), в связи с чем его можно попросту не учитывать в расчетах деревянных конструкций на огнестойкость.

Наконец, следует помнить, что независимо от температуры механическая прочность древесины быстро возрастает с уменьшением влажности. Для древесины ели это положение проиллюстрировано графиком зависимости прочности при растяжении (кривая 1), изгибе (кривая 2) и сжатии (кривая 3), приведенным на рис. 6.11.

Данные о температурных полях и об изменениях механических свойств древесины недостаточно достоверны. В связи с этим для расчета огнестойкости целесообразно пользоваться полуэмпирическими методами, для которых нет необходимости точно знать истинные ха-

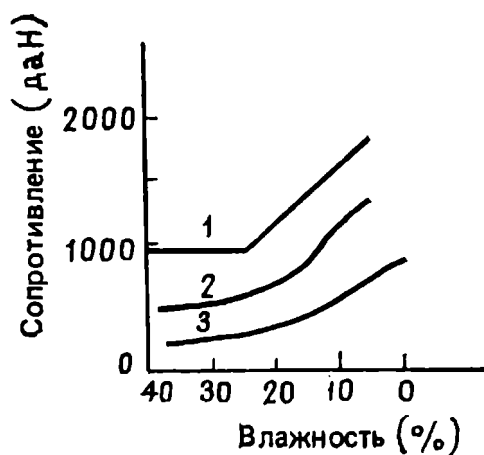


РИС. 6.11

1 — растяжение; 2 — изгиб; 3 — сжатие

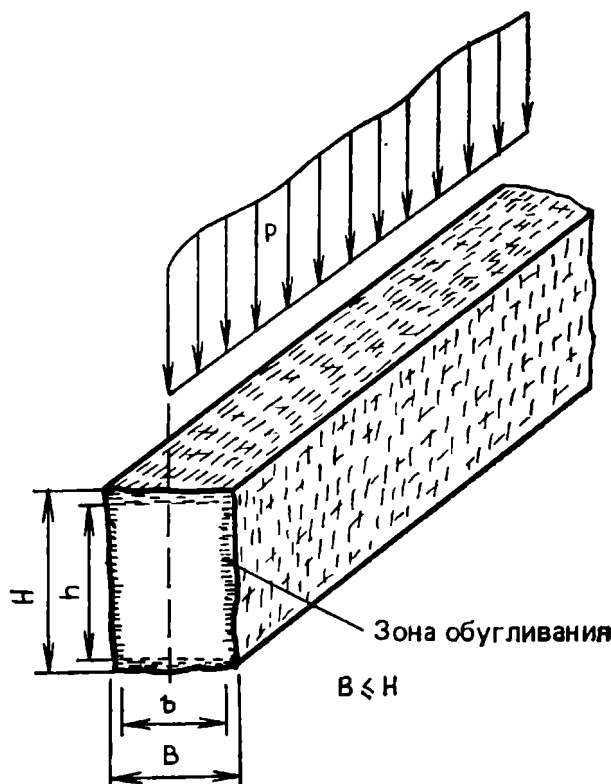


РИС. 6.12

рактеристики материала, а следует лишь сопоставлять с экспериментальными данными несколько коэффициентов, не имеющих физического смысла и произвольно вводимых в абстрактное математическое выражение задачи.

**6.4.2. Упрощенный метод расчета [6.4].** Он базируется на трех гипотезах:

считается, что элемент деревянной конструкции находится в условиях стандартного пожара;

принимают, что прочность при сжатии и модуль упругости древесины уменьшаются на величину  $\alpha$  по сравнению с их значениями при нормальной температуре ( $0 \leq \alpha \leq 1$ );

поверхностное обугливание происходит с постоянной скоростью  $\beta$ , проникания вглубь.

Кроме того, предполагается, что элемент перестает выполнять свою несущую функцию, когда приложенная нагрузка становится равной несущей способности элемента, определенной на основе обычных правил расчета [6.6] с одновременным учетом трех вышеизложенных гипотез.

**6.4.2.1. Расчет балок на прочность.** Максимальное напряжение  $\sigma$  в балке при простом изгибе составляет

$$\sigma = \alpha p l^2 / (B H^2), \quad (6.1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от типа конструкции (статически определимая или неразрезная балка);  $p$  — равномерно распределенная нагрузка (на 1 м);  $B$ ,  $H$  и  $l$  — геометрические характеристики балки до пожара.

Если нагрев балки происходит по всем четырем сторонам (рис. 6.12), то ее поперечные размеры уменьшаются со скоростью  $2\beta$  и в момент разрушения составляют

$$\left. \begin{aligned} b &= B - 2\beta t \\ h &= H - 2\beta t \end{aligned} \right\} \Rightarrow B - b = H - h. \quad (6.2)$$

При этом максимальное напряжение  $\sigma = \alpha p_u l^2 / (bh^2)$  достигает величины предельного напряжения (прочности древесины при нагреве), которое, в свою очередь, равно прочности древесины при нормальной температуре, умноженной на коэффициент  $\alpha$ :

$$\sigma_u = \alpha p_u l^2 / (BH^2), \quad (6.3)$$

где  $p_u$  — несущая способность при нормальной температуре.

Отсюда после упрощений получим

$$p/p_u = \alpha [1 - (2\beta t/H)]^2 [1 - (2\beta t/B)]. \quad (6.4)$$

На практике верхняя поверхность балки часто защищена от воздействия огня поддерживаемым ею перекрытием, в связи с чем огонь действует на нее лишь с трех сторон. При этом размеры балки в момент разрушения составляют

$$\left. \begin{aligned} b &= B - 2\beta t \\ h &= H - \beta t \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{B-b}{2} = H-h, \quad (6.5)$$

и в этом случае мы получаем соотношение

$$\frac{p}{p_u} = \alpha [1 - (\beta t/H)]^2 [1 - (2\beta t/B)]. \quad (6.6)$$

**6.4.2.2. Расчет колонн на прочность.** В колоннах с малой гибкостью, потеря устойчивости которых исключается, нагрузка  $P$  связана с сжимающим напряжением  $\sigma$  и с размерами прямоугольного сечения  $H$  и  $B$  соотношением

$$P = \sigma BH. \quad (6.7)$$

В момент разрушения это выражение принимает вид

$$P = \alpha \sigma_u bh, \quad (6.8)$$

где

$$b = B - 2\beta t; \quad h = H - 2\beta t. \quad (6.9)$$

Кроме того, прочность  $\sigma_u$  связана с несущей способностью при нормальной температуре с помощью соотношения

$$\sigma_u = P_u / (BH), \quad (6.10)$$

откуда

$$P = \alpha P_u / (BH) (B - 2\beta t) (H - 2\beta t) \quad (6.11)$$

или

$$P/P_u = \alpha [1 - (2\beta t/B)] [1 - (2\beta t/H)]. \quad (6.12)$$

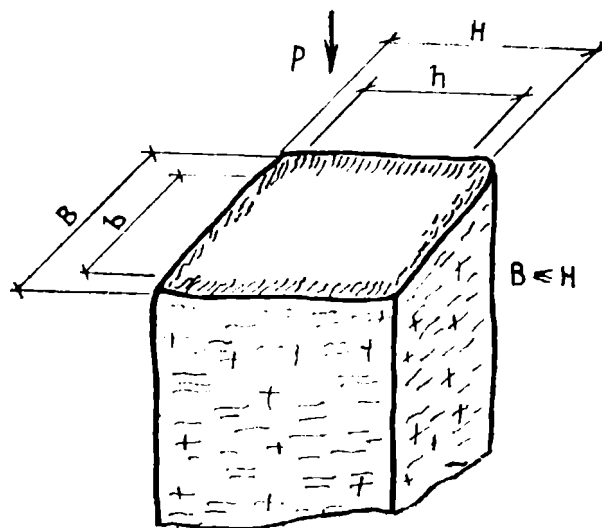


РИС. 6.13

Если существует опасность потери устойчивости колонны, то ее можно учесть с помощью теории Эйлера, которая дает выражение критической нагрузки в виде

$$P_u = \pi^2 E B H / \left( \frac{l_0}{r} \right)^2, \quad (6.13)$$

где  $l_0$  — расчетная длина колонны, зависящая от условий закрепления на концах;  $r$  — радиус инерции сечения.

Для прямоугольного сечения

$$r^2 = I / (B H) = B H^3 / (12 B H) = H^2 / 12 \quad (B < H), \quad (6.14)$$

откуда

$$P_u = \pi^2 E B H^3 / (12 l_0^2). \quad (6.15)$$

В момент разрушения, с учетом одновременного поверхностного обугливания и повышения температуры в центре сечения, эйлеровская критическая нагрузка составляет

$$P'_u = \pi^2 \alpha E b h^3 / (12 l_0^2), \quad (6.16)$$

где

$$b = B - 2\beta t; \quad h = H - 2\beta t. \quad (6.17)$$

Эта несущая способность колонны при пожаре равна нагрузке, приложенной к колонне:

$$P = P'_u. \quad (6.18)$$

Определяя величину  $\pi^2 E / 12 l_0^2$  из выражения (6.16), получим

$$P / P_u = \alpha [1 - (2\beta t / B)] [1 - (2\beta t / H)]^3. \quad (6.19)$$

В заключение укажем, что для определения предела огнестойкости колонн можно использовать формулу

$$p / p_u = \alpha [1 - (2\beta t / B)] [1 - (2\beta t / H)]^n, \quad (6.20)$$

в которой показатель степени  $n$  изменяется в пределах от 1 до 3 в зависимости от опасности потери устойчивости.

**6.4.2.3. Приближенные формулы.** В приведенные выше уравнения предел огнестойкости  $t$  входит в неявном виде, в связи с чем их решение обычными, т. е. «ручными», методами затруднительно. Поэтому целесообразно вывести на их основе приближенные формулы, в которые время  $t$  должно входить в явном виде.

С этой целью следует прежде всего выбрать значения  $\alpha$  и  $\beta$ , поскольку приемлемость приближенных формул обуславливается их соответствием экспериментальным данным.

Величина  $\beta = 0,06$  см/мин является средним значением, хотя в углах поперечного сечения скорость обугливания в глубь сечения обычно выше.

Значение  $\alpha$  можно принять на основе некоторых экспериментальных данных, которые свидетельствуют о том, что во время пожара механические характеристики древесины (прочность и жесткость) снижаются на 10—15% [6.7]. Тогда вполне обосновано можно принять  $\alpha = 0,85$ . Однако с учетом замечания, сделанного нами выше отно-

Таблица 6.2

| $P/P_u$            | Балки | Колонны      |                 |
|--------------------|-------|--------------|-----------------|
|                    |       | $l_0/B > 10$ | $l_0/B \leq 10$ |
| $> 0,75$           | 1     | 1            | 1,2             |
| $\leq 0,75; > 0,5$ | 1,1   | 1,1          | 1,3             |
| $\leq 0,5$         | 1,3   | 1,3          | 1,5             |

сительно  $\beta$ , целесообразно принять несколько меньшее значение  $\alpha$ , а именно  $\alpha = 0,8$ .

На основе такого выбора значений  $\alpha$  и  $\beta$  приведенные выше уравнения были решены и упрощены с помощью ЭВМ, в результате чего в работе [6.5] рекомендуются следующие приближенные формулы:

Балки :

$$\left. \begin{array}{l} \text{нагрев с 4 сторон} \quad t = 100fB(4 - 2B/H); \\ \text{нагрев с 3 «} \quad t = 100fB(4 - B/H); \end{array} \right\} \quad (6.21)$$

Колонны

$$t = 100fB(3 - B/H).$$

В формулах (6.21) принимается  $B < H$ .

Искусственно введенный в эти формулы коэффициент  $f$  зависит от отношения  $P/P_a$  ( $P_a$  — расчетная нагрузка), а также от гибкости колонны (табл. 6.2).

На рис. 6.14 приведены результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных. В отдельных случаях наблюдается разница порядка 35—40%, что является вполне объяснимым, если иметь в виду, что при испытаниях одинаковых образцов разница в результатах часто достигает 30% [6.4].

#### 6.4.2.4. Примеры

1. Определить предел огнестойкости балки прямоугольного сечения  $25 \times 75$  см в условиях стандартного пожара при ее нагреве с трех сторон, если нагрузка составляет 75% расчетной:  $f = 1,1 \Rightarrow t = 100 \cdot 1,1 \cdot 0,25 [4 - (0,25 - 0,75)] = 101$ . Таким образом, эта балка имеет предел огнестойкости 101 мин.

2. Определить предел огнестойкости  $t$  колонны сплошного сечения  $20 \times 18$  см, высотой 2,275 м при нагрузке 18 тс:  $l_0/B = 2,275/0,18 = 12,64$ .

Предполагая, что допускаемое напряжение данной породы дерева при сжатии составляет 130 бар, получим  $P_a = 46,8$  т;  $P/P_a = 0,38$ , откуда  $f = 1,3$ ;  $t = 100 \cdot 1,3 \times 0,18 [3 - (0,18/0,2)] = 49$  мин. При испытаниях получен предел огнестойкости 57 мин.

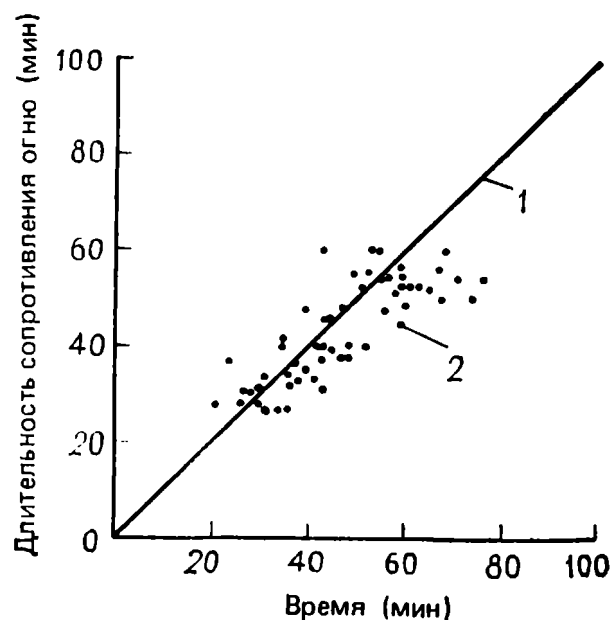


РИС. 6.14. ДЛИТЕЛЬНОСТЬ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОГНЮ

1 — расчет; 2 — эксперимент

**6.4.3. Общий метод проверки. 6.4.3.1. Основные положения.** Зная предел огнестойкости деревянного каркаса, требуемый нормами, следует проверить, продолжает ли он нести приложенную к нему нагрузку и не подвержен ли явлениям потери устойчивости. При этом следует учитывать уменьшение поперечных сечений элементов вследствие обугливания, а также снижение прочности в центральной части сечений.

**6.4.3.2. Основные гипотезы.** Скорость обугливания составляет примерно 1 см за четверть часа по одной стороне элемента.

В соответствии с рекомендациями [6.3] на конструкцию действуют следующие сочетания нормативных нагрузок: постоянные нагрузки + эксплуатационные нагрузки + снег; постоянные нагрузки + ветер; постоянные нагрузки + половина снеговой нагрузки + ветер. Следует отметить, что эти сочетания отличаются от сочетаний, указанных в Единых технических документах по определению огнестойкости железобетонных и стальных конструкций (см. гл. 3 и 4).

В качестве теоретического разрушающего напряжения для клееной древесины с учетом коэффициента безопасности 1,2 принимается значение  $\sigma_R = 275$  бар [6.3].

Надежные данные о температуре в древесине, снижении ее механических свойств, скорости обугливания и теоретическом напряжении при разрушении отсутствуют. Тем не менее можно предположить, что уменьшенное сечение элемента деревянного каркаса сохраняет те же механические свойства, что и при нормальной температуре. Однако при этом необходимо учитывать снижение несущей способности в случаях, когда проверку производят относительно напряжения, свойственного нормальной температуре. При этом произвольно принимают величину, составляющую 85% прочности древесины при нормальной температуре.

**6.4.3.3. Содержание проверки.** Для сжатых и изгибаемых элементов проверяется неравенство

$$N/A_r + M / \left( \frac{I}{v} \right)_r \leq \sigma_r, \quad (6.22)$$

где  $A_r$  и  $(I/v)_r$  — соответственно площадь и момент инерции уменьшенного сечения элемента.

При проверке колонн следует учитывать возможность потери устойчивости, которая может произойти во время пожара, даже в том случае, когда она исключается при нормальной температуре.

## **Приложение. ПРОПИТКА ОГНЕЗАЩИТНЫМИ СОСТАВАМИ**

Для сохранения естественного внешнего вида и фактуры дерева, а также снижения опасности его возгорания можно прибегать к различным методам огнезащиты, которая может быть глубокой или поверхностной.

Глубокая огнезащита заключается в пропитке древесины определенным количеством разных солей: фосфатов аммония  $(\text{NH}_4)_2 \text{HPO}_4$  и  $(\text{NH}_4)\text{H}_2\text{PO}_4$ , сульфата аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  и буры  $\text{NaAl}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  в автоклаве под давлением 10—15 атмосфер в течение нескольких часов. Можно также производить «закалку» дерева в огнезащитном растворе, который всасывается в древесину

вследствие резкого охлаждения содержащегося в ней воздуха. После всасывания достаточного количества раствора (не менее 75 кг соли на 1 м<sup>3</sup>) древесину высушивают, и соли откладываются в ней в виде мелких кристаллов.

Хотя при глубокой огнезащите и предполагается полная пропитка древесины солями, на практике ее глубина редко превышает 2 см, что является тем не менее вполне достаточным для существенного повышения сопротивления обработанной таким образом древесины воздействию огня.

Поверхностная огнезащита состоит в окраске древесины соответствующими материалами и представляет собой более простой процесс. При этом важно обеспечить сохранение качества и постоянство свойств защитных материалов во времени. Французским техническим объединением по огнезащите (GTFI)<sup>1</sup> разработан специальный знак качества, присваиваемый тем огнезащитным материалам, нанесение которых делает трудновозгораемым (МЗ)<sup>2</sup> панели из древесины ели толщиной 10 мм, твердые изоляционные волокнистые панели, панели из тонкой фанеры или древесно-волокнистые (древесно-стружечные) панели толщиной 19 мм.

Можно также осуществлять поверхностную огнезащиту дерева путем брызга огнезащитного раствора или простого смачивания в нем. К сожалению, этот весьма простой способ не является эффективным, поскольку на поверхности древесины остается очень небольшое количество солей. Кроме того, соли достаточно легко смываются, в связи с чем такой метод огнезащиты не следует применять к элементам конструкций, находящихся во влажной среде.

Наконец, необходимо отметить, что некоторые огнезащитные покрытия, будучи достаточно эффективными против воздействия огня, должны быть, тем не менее, отвергнуты вследствие выделения ими токсичных газов при нагреве.

Все огнезащитные материалы оказывают влияние либо на процесс горения в газообразной фазе, т.е. на возгорание, либо на процесс разложения древесины. Различают три основных вида воздействия огнезащитных материалов.

1. Действие инертных газов, выделяемых защитными материалами. Объем этих газов (газообразный аммиак, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и др.) в сочетании с объемом газов, обычно выделяемых древесиной (см. табл. 6.1), может оказаться достаточным, чтобы воспрепятствовать достижению порога возгораемости полным объемом этих газов или задержать момент возгорания, ограничивая затем размеры и длительность фазы активного горения при наличии пламени.

2. Повышение температуры образования горючих газов. Наличие определенных фосфатов, сульфатов, соединений хлора и т.п. изменяет под действием тепла процесс разложения органических материалов: активное горение с образованием пламени может иметь место только при более высокой температуре, которая может быть достигнута в течение более длительного периода.

3. Снижение температуры обугливания. Под влиянием тепла огнезащитные материалы выделяют кислоты (например, фосфорную), которые способствуют быстрому образованию обугленного слоя на поверхности дерева с одновременным выделением углекислого газа и водяного пара. Таким образом, происходит своеобразное «короткое замыкание» опасной фазы горения, которая начинается (см. разд. 6.2.2) при температуре около 280 °С с образованием весьма горючих газов (углеводородов и водорода). В результате обугленный слой образуется без значительных выделений горючих газов, и при этом он служит своего рода изоляцией от возгорания последующих слоев древесины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[6.1] L. Amy. — *Les bases physico-chimiques de la combustion de la cellulose et des matériaux ligneux*. Cahier n° 45 du Centre Technique du Bois, 10, av. St-Mandé 75012, Paris.

<sup>1</sup> В соответствии с постановлением от 4 июня 1973 г. о классификации строительных материалов и конструкций по огнестойкости и определении методов испытаний с дополнениями и изменениями.

<sup>2</sup> Согласно постановлению от 19 декабря 1975 г. (см. «Журналь Оффисьель» от 26 июля 1973 г. и от 26 февраля 1976 г.).

- [6.2] C.T.B. — *Le Comportement du bois au feu*. Cahier n° 74 du C.T.B.
- [6.3] S.N.C.C.B.L.C. — *Les charpentes en bois lamellé-collé*. Ed. Eyrolles, Paris.
- [6.4] T.T. Lie. — *A method for assessing the fire resistance of laminated timber beams and columns*. National Research Council of Canada, Ottawa, Canada.
- [6.5] C.T.B. — *Les structures en bois lamellé-collé*. Cahier n° 93 du C.T.B., France.
- [6.6] D.T.U. — *Règles de calcul et de conception des charpentes en bois (CB 71)*. Éditions Eyrolles, Paris. 1971.
- [6.7] K. Imaizumi. — *Stability in fire of protected and unprotected glued laminated beams*. Norw. Inst. Wood working Tech., Meddelelse nr. 18, 1962.
- [6.8] K. Odeen. — *Fire resistance of glued, laminated timber structures*. Fire Res. Org. Symp. n° 3. Paper n° 2. H. M. Stationery Office. London England pp. 7—15, 1970.
- [6.9] J. Stanke. — *Ein Beitrag zur theoretischen Ermittlung der Feuerwiderstandsdauer von einteiligen, brett-schichtverleimten Stützen unter Druckbeanspruchung*. VFDB-Zeitschrift, 19 Jahrgang 1970, Heft 2.
- [6.10] Cahier des Spécifications n° 1 concernant les ossatures en bois lamellé-collé ou en bois massif. APSAI, 11, rue Pillet-Will, Paris.
- [6.11] Assurance incendie dans les établissements industriels et commerciaux. APSAI, 11, rue Pillet-Will, Paris.

## СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жуков В. В., Гусев А. А. Свойства тяжелого бетона после пожара. — Бетон и железобетон, 1983, № 1, с. 25—26.
2. Жуков В. В. Физическая модель процесса разрушения влажного бетона при нестационарном нагреве. — Бетон и железобетон, 1981, № 10, с. 15—16.
3. Макагонов В. А. Бетон в условиях высокотемпературного нагрева. — М.: Стройиздат, 1979, — 84 с.
4. Огнестойкость зданий/Бушев В. П., Пчелинцев В. А., Федоренко В. О. и др. — М.: Стройиздат, 1970, с. 83.
5. СНиП II-2-80. Противопожарные нормы проектирования зданий и сооружений. — М.: Стройиздат, 1981. — 13 с.
6. Стандарт СЭВ 1000—78. Противопожарные нормы строительного проектирования. Методы испытания строительных конструкций на огнестойкость. — М.: Стройиздат, 1979, — 17 с.

Приложение. ПЕРЕВОД НЕКОТОРЫХ ЕДИНИЦ В СИ

| Величина                     | Единица                                    |                 |                           |             | Соотношение единиц                                           |
|------------------------------|--------------------------------------------|-----------------|---------------------------|-------------|--------------------------------------------------------------|
|                              | принятая в книге                           |                 | СИ                        |             |                                                              |
|                              | наименование                               | обозначение     | наименование              | обозначение |                                                              |
| Сила; нагрузка; вес          | килограмм-сила<br>тонна-сила<br>грамм-сила | кгс<br>тс<br>гс | ньютон                    | Н           | 1 кгс≈9,8 Н<br>1 тс≈9,8·10³Н≈9,8 кН<br>1 гс≈9,8·10⁻³Н≈9,8 мН |
| Линейная нагрузка            | килограмм-сила на метр                     | кгс/м           | ньютон на метр            | Н/м         | 1 кгс/м≈9,8 Н/м                                              |
| Поверхностная нагрузка       | килограмм-сила на квадратный метр          | кгс/м²          | ньютон на квадратный метр | Н/м²        | 1 кгс/м²≈9,8 Н/м²                                            |
| Механическое напряжение      | килограмм-сила на квадратный миллиметр     | кгс/мм²         |                           |             | 1 кгс/мм²≈9,8 МПа                                            |
| Модуль продольной упругости; | килограмм-сила на квадратный сантиметр;    | кгс/см²         | паскаль                   | Па          | 1 кгс/см²≈0,1 МПа                                            |
| модуль сдвига                | бар                                        | бар             |                           |             | 1 бар=0,1 МПа                                                |
| Момент силы                  | килограмм-сила-метр                        | кгс·м           | ньютон-метр               | Н·м         | 1 кгс·м≈9,8 Н·м                                              |
| Количество теплоты           | калория<br>килокалория                     | кал<br>ккал     | джоуль                    | Дж          | 1 кал≈4,2 кДж<br>1 ккал≈4,2 Дж                               |

| Величина                          | Единица                                                                                  |                                |                                            |                        | Соотношение единиц                                                                    |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                                   | принятая в книге                                                                         |                                | СИ                                         |                        |                                                                                       |
|                                   | наименование                                                                             | обозначение                    | наименование                               | обозначение            |                                                                                       |
| Массовая удельная теплоемкость    | калория на грамм-градус Цельсия;<br>килокалория на килограмм-градус Цельсия              | кал/(г·°С)<br>ккал/(кг·°С)     | джоуль на килограмм-кельвин                | Дж/(кг·К)              | 1 кал/(г·°С)≈<br>≈4,2·10 <sup>3</sup> Дж/(кг·К)<br>1 ккал/(кг·°С)≈<br>≈4,2 кДж/(кг·К) |
| Теплопроводность                  | калория на секунду сантиметр-градус Цельсия;<br>килокалория в час на метр-градус Цельсия | кал/(с·см·°С)<br>ккал/(ч·м·°С) | ватт на метр-градус (Цельсия или Кельвина) | Вт/(м·К)               | 1 кал/(с·см·°С)≈<br>≈420 Вт/(м·К)<br>1 ккал/(ч·м·°С)≈<br>≈1,16 Вт/(м·К)               |
| Пожарная нагрузка                 | мегакалория на квадратный метр                                                           | Мкал/м <sup>2</sup>            | мегаджоуль на квадратный метр              | МДж/м <sup>2</sup>     | $\frac{1 \text{ М кал}}{\text{м}^2} \approx 4,19 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^2}$       |
| Объемная удельная теплоемкость    | килокалория на кубический метр-градус Цельсия                                            | ккал/м <sup>3</sup> ·°С        | джоуль на кубический метр-кельвин          | Дж/(м <sup>3</sup> ·К) | 1 ккал/(м <sup>3</sup> ·°С)≈<br>≈4,2 кДж/(м <sup>3</sup> ·К)                          |
| Механическое напряжение<br>Модуль | деканьютон на квадратный сантиметр                                                       | даН/см <sup>2</sup>            | паскаль                                    | Па                     | 1 даН/см <sup>2</sup> ≈10 <sup>-3</sup> Па≈<br>≈1 мПа                                 |
| Нагрузка                          | деканьютон                                                                               | даН                            | ньютон                                     | Н                      | даН=10 Н                                                                              |
| Момент                            | деканьютон-метр                                                                          | даН·м                          | ньютон-метр                                | Н·м                    | даН·м=10 Н·м                                                                          |

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Предисловие к русскому изданию . . . . .                                                                                                                      | 5   |
| Предисловие . . . . .                                                                                                                                         | 7   |
| От авторов . . . . .                                                                                                                                          | 9   |
| <b>Г л а в а I. Общие положения</b> . . . . .                                                                                                                 | 10  |
| 1.1. Исторический очерк и современные тенденции . . . . .                                                                                                     | 10  |
| 1.2. Принципы безопасности . . . . .                                                                                                                          | 12  |
| 1.3. Огнестойкость . . . . .                                                                                                                                  | 13  |
| 1.4. Цель книги . . . . .                                                                                                                                     | 14  |
| 1.5. Значение огнестойкости . . . . .                                                                                                                         | 15  |
| Список литературы . . . . .                                                                                                                                   | 15  |
| <b>Г л а в а 2. Пожар</b> . . . . .                                                                                                                           | 16  |
| 2.1. Значение проблемы . . . . .                                                                                                                              | 16  |
| 2.2. Эксперименты и результаты . . . . .                                                                                                                      | 16  |
| 2.3. Теоретическая формулировка . . . . .                                                                                                                     | 21  |
| 2.4. Практические расчеты . . . . .                                                                                                                           | 21  |
| 2.5. Оценка теплового потенциала движимого и недвижимого имущества . . . . .                                                                                  | 31  |
| 2.6. Стандартный пожар . . . . .                                                                                                                              | 33  |
| Список литературы . . . . .                                                                                                                                   | 46  |
| <b>Г л а в а 3. Огнестойкость железобетонных конструкций</b> . . . . .                                                                                        | 47  |
| 3.1. Введение . . . . .                                                                                                                                       | 47  |
| 3.2. Воздействие температуры на бетон . . . . .                                                                                                               | 48  |
| 3.3. Изменение механических и теплофизических свойств бетона в зависимости от температуры . . . . .                                                           | 54  |
| 3.4. Изменение механических и теплофизических свойств арматуры для обычного и предварительно напряженного железобетона в зависимости от температуры . . . . . | 65  |
| 3.5. Нагрев бетонных элементов . . . . .                                                                                                                      | 66  |
| 3.6. Расчет огнестойкости железобетонных конструкций . . . . .                                                                                                | 77  |
| 3.7. Огнестойкость предварительно напряженного железобетона . . . . .                                                                                         | 88  |
| 3.8. Частные задачи . . . . .                                                                                                                                 | 88  |
| <i>Приложение. Теоретический анализ поворота на опорах неразрезных балок и плит</i> . . . . .                                                                 | 89  |
| Список литературы . . . . .                                                                                                                                   | 92  |
| <b>Г л а в а 4. Огнестойкость стальных конструкций</b> . . . . .                                                                                              | 93  |
| 4.1. Введение . . . . .                                                                                                                                       | 93  |
| 4.2. Материалы и способы защиты . . . . .                                                                                                                     | 94  |
| 4.3. Нагрев стальных конструкций . . . . .                                                                                                                    | 103 |
| 4.4. Критические температуры . . . . .                                                                                                                        | 121 |
| 4.5. Примеры расчета . . . . .                                                                                                                                | 135 |
| 4.6. Неравномерный нагрев конструкций . . . . .                                                                                                               | 137 |
| <i>Приложение I. Сведения о защитных материалах</i> . . . . .                                                                                                 | 150 |
| <i>Приложение II. Коэффициенты массивности</i> . . . . .                                                                                                      | 158 |
| <i>Приложение III. Коэффициенты статической неопределимости</i> . . . . .                                                                                     | 164 |
| <i>Приложение IV. Номограммы для определения критической температуры элементов конструкций со стесненной продольной температурной деформацией</i> . . . . .   | 165 |
| Список литературы . . . . .                                                                                                                                   | 167 |

|                                                                                                               |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Глава 5. Огнестойкость сталежелезобетонных конструкций . . . .</b>                                         | <b>168</b> |
| 5.1. Общие положения . . . . .                                                                                | 168        |
| 5.2. Колонны замкнутого сечения, заполненные бетоном . . . . .                                                | 169        |
| 5.3. Комплексные балки . . . . .                                                                              | 182        |
| 5.4. Плиты со стальной листовой опалубкой, остающейся в бетоне<br>и включаемой в работу конструкции . . . . . | 190        |
| <i>Приложение. Метод расчета пластического момента в поперечном<br/>сечении комплексной балки . . . . .</i>   | <i>192</i> |
| Список литературы . . . . .                                                                                   | 196        |
| <b>Глава 6. Огнестойкость деревянных несущих конструкций . . . . .</b>                                        | <b>197</b> |
| 6.1. Введение . . . . .                                                                                       | 197        |
| 6.2. Поведение древесины при действии огня . . . . .                                                          | 198        |
| 6.3. Материалы и способы защиты древесины . . . . .                                                           | 201        |
| 6.4. Прогноз огнестойкости незащищенных несущих конструкций . . . . .                                         | 204        |
| <i>Приложение. Пропитка огнезащитными составами . . . . .</i>                                                 | <i>210</i> |
| Список литературы . . . . .                                                                                   | 211        |
| Список дополнительной литературы . . . . .                                                                    | 212        |
| Приложение. Перевод некоторых единиц в СИ . . . . .                                                           | 213        |

**Бернар Бартелеми, Жюль Крюппа**

## **ОГНЕСТОЙКОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Редакция переводных изданий

Зав. редакцией Р. Л. Рощина

Редактор Л. Г. Беглецова

Мл. редактор Е. Г. Ежова

Технический редактор Л. И. Шерстнева

Корректор Н. А. Беляева

**ИБ № 2845**

---

Сдано в набор 16.07.84. Подписано в печать 16.10.84.

Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл. печ. л. 13,5.

Усл. кр.-отт. 13,75. Уч. изд. л. 14,99. Тираж 8000 экз. Изд. № AVIII-471 Заказ 368. Цена 1 руб.

---

Стройиздат, 101442, Москва, Каляевская, 23а

Московская типография № 4 Союзполиграфпрома

при Государственном комитете СССР

по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.

129041, Москва, Б. Переяславская ул., 46