

Роль огнезащиты в системе обеспечения пожарной безопасности

Оптимальное проектирование строительных конструкций, отвечающих требованиям по огнестойкости, осуществляется с целью обоснованного выбора таких материалов, структуры, формы, размеров, условий опирания и параметров огнезащиты, каждой конкретной СКУ, которые гарантируют минимум ее массы, материалоемкости и стоимости.

При оптимальном проектировании необходимо учитывать конструктивные, эксплуатационные, технологические и технико-экономические факторы:

- значение требуемого предела огнестойкости
- тип конструкции и ориентацию защищаемых поверхностей в пространстве (колонны, балки, стойки)
- вид нагрузок, действующих на конструкцию, а также режим нагружения
- температурно - влажные условия эксплуатации огнезащиты
- степень агрессивности окружающей среды по отношению к огнезащите и материалу конструкций.
- увеличение нагрузки на конструкцию за счет массы огнезащиты
- период монтажа огнезащиты (во время возведения здания)
- эстетические требования
- техничко –экономические показатели

Существует два подхода к проектированию конструкций, отвечающих требованиям по огнестойкости:

1. Подход основан на рекомендациях СНиП 21-01-97 по минимальным пределам огнестойкости СК
2. Подход, основанный на анализе планировочных и конструктивных характеристик здания, вида и количества пожарной нагрузки в его помещениях , а также на переходе от продолжительности реального пожара к эквивалентной продолжительности пожара через типовые строительные конструкции.

В соответствии со СНиПом второй подход применим к тем зданиям, для которых отсутствуют противопожарные нормы.

При первом подходе требуемые пределы огнестойкости строительных конструкций здания принимают равными минимальным пределам огнестойкости, приведены в таблице СНиПа 21-01-97, а пределы огнестойкости каждой конкретной конструкции определяют с использованием стандартного температурного режима.

Оптимальные параметры конструкций (средств огнезащиты), удовлетворяющих требованиям по огнестойкости при минимальной массе, материалоемкости и стоимости, рассчитываются в соответствии с предлагаемым алгоритмом оптимального проектирования.

При проведении оптимизации следует учитывать (в качестве ограничений) совокупность требований к огнезащите:

- простоту и технологичность изготовления монтажа на объекте.
- надежную связь с материалом конструкции и инертностью по отношению к нему
- совместную работу с конструкцией под нагрузкой
- устойчивость к внешним воздействиям при монтаже и эксплуатации
- отсутствие токсичных выделений при эксплуатации, а также аллергического действия на людей
- достаточно гарантийный срок эксплуатации (долговечность)
- возможность замены и восстановления в зависимости от условий эксплуатации
- наличие надлежащих защитно-декоративных качеств.

Фактические пределы огнестойкости СК рассчитываются как на этапе проектирования конструкций без огнезащиты, так и на этапе проектирования конструкций с огнезащитой.

Для расчета следует использовать методики, учитывающие с достаточной точностью все основные тепловые, физико-химические и механические процессы, происходящие в конструкциях с огнезащитой

при пожаре, а также сопровождающие их изменения теплофизических и механических свойств материалов. Адекватность натуре используемых моделей должна быть подтверждена сравнением результатов расчета с экспериментальными данными.

Современные способы моделирования пожаров в помещениях

Математическому моделированию пожаров посвящено много работ, но наиболее изученными и отработанными являются так называемые интегральные модели пожаров. Эти модели построены с использованием усредненных по объему аварийного помещения параметров заполняющей его газовой среды: температуры, плотности, давления, концентрации компонентов.

Интегральные модели основаны на применении законов сохранения массы и энергии, представляемых в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений относительно соответствующих среднеобъемных параметров.

Применимость интегральных моделей пожара для расчета параметров теплового воздействия на строительные конструкции с огнезащитой в условиях пожара носит ограниченный характер. Это обусловлено прежде всего тем, что теплоотдача различных элементов СК изучена недостаточно и имеющиеся эмпирические формулы не охватывают всего многообразия СК и оборудования, а также возможных условий, влияющих на теплообмен элементов СК с газовой средой при пожаре.

Расширить область применения интегрального метода моделирования пожаров позволяют зональные модели. Их сущность заключается в разбиении внутреннего объема АП на зоны, в пределах которых используют интегральный метод. Зоны выбирают таким образом, чтобы в пределах каждой из них газовую среду можно было с достаточной точностью описать усредненными параметрами. Для каждой из зон составляют систему дифференциальных уравнений, выражающих законы сохранения массы и

энергии. Количество зон определяется характером решаемой задачи, а также размещением пожарной нагрузки и проемов в АП.

Более детально развитие пожара в АП описывается методом дифференциального моделирования.

Дифференциальные модели позволяют получать исчерпывающую информацию о полях скорости и температуры, концентрации кислорода, продуктов сгорания, тушащего агента, лучистых и конвективных тепловых потоков в АП. Поэтому основной областью применения их являются локальные пожары и начальная стадия развивающегося пожара.

При практической реализации дифференциальных моделей пожара возникают проблемы, обусловленные сложностью:

- учета сжимаемости газовой среды и малых перепадов давления в АП;

- численного моделирования турбулентного переноса в запыленной частицами дыма среде;

- применение в дискретной форме кинетических моделей горения реальных многокомпонентных газовых смесей;

- учета рассеяния излучения на частицах дыма;

- определение условий однозначности, в частности, в зоне проемов.

Также предложена комбинированная модель пожара, основанная на рациональном сочетании интегральной и дифференциальной моделей.

К параметрам модели, предназначенным для переноса результатов модельных стендовых экспериментов на натуре, отнесены:

- параметр принятой алгебраической модели турбулентности;

- параметр лучистого переноса теплоты в газах;

- параметр лучистого переноса теплоты в огнезащите.

Кроме того, выделены коэффициенты и параметры, подлежащие экспериментальному определению в лабораторных условиях:

- Коэффициенты вспучивания или усадки разлагающихся материалов;

- Параметры кинетики пиролиза материалов;

- Теплофизические характеристики материалов в исходном состоянии

Остальные коэффициенты берутся из справочников.

Приведение заданного реального пожара к стандартному пожару огнестойкости рассматриваемой строительной конструкции осуществляется расчетным путем. Для рассматриваемой СК сначала рассчитывается фактический предел огнестойкости по одному из предельных состояний при заданной температурной кривой реального пожара. Затем по данному предельному состоянию определяется значение фактического предела огнестойкости при стандартном температурном режиме. Полученное значение предела огнестойкости и будет эквивалентным значением огнестойкости для заданного реального пожара.

Физическая постановка задачи о развитии пожара в помещениях

Постановка задачи включает: анализ пожароопасных ситуаций в конкретных помещениях, их геометрическую схематизацию, физическую схематизацию процессов, происходящих в аварийных помещениях при пожаре, выбор математических моделей для их описания.

В результате анализа пожароопасных ситуаций выбирается вероятная их них, а также определяется: качественный характер пожарной нагрузки (типы горючих или поддерживающих горение материалов, находящихся в помещении), масса пожарной нагрузки, геометрические параметры распределения пожарной нагрузки в помещении, расположение наиболее вероятных источников зажигания. Кроме того, определяется расположение по отношению к вероятному очагу пожара несущих элементов конструкции и внутренних объектов, нуждающихся в противопожарной защите.

Наиболее рациональными и универсальными по отношению к реальным пожароопасным ситуациям представляются расчетные схемы на стр 133. На них показаны основные подобласти (зоны) расчетной области, принципиально отличающиеся от другой по характеру происходящих в них тепломассообменных процессов. Разумеется, в каждом конкретном случае число зон и их пространственная геометрия будут различны. При построении

расчетного алгоритма удобно их рассматривать и описывать математически по отдельности, устанавливая связь между соответствующими уравнениями через граничные условия. Важно для каждой из зон выделить определяющие физические процессы сформулировать свои упрощающие допущения.

Зона газификации горючего. Определяющим физическим процессом в зоне горючего является испарение для случая жидкого горючего или термическое разложение для случая, когда горючим является дерево, полимерный материал. Этот процесс сопровождается поглощением теплоты. Во многих практически важных случаях для него «проходит» допущенные о квазистационарности.

В геометрическом отношении горючее можно представить в виде достаточно протяжного слоя заданной толщины, теплоизолированного по «холодной» поверхности. Задается площадь поверхностного горючего (горения) либо как константа (разлитое жидкое горючее), либо как функция времени.

Состав продуктов газификации горючего считается равновесным и определяется термодинамическим расчетом по элементарному составу горючего.

Зона горения. Определяющими процессами в этой зоне являются: выделение теплоты и продуктов сгорания, поглощение (расход) горючих газов и кислорода.

В геометрическом отношении зону горения можно рассматривать как узкий фронт, расположенный у поверхности горючего, или как область, ограниченную изотермической поверхностью с температурой, равной температуре воспламенения смеси углеводородов с воздухом (около 500 С),. Тепловыделение при этом можно считать равномерно распределенным либо по поверхности фронта горения, либо по объему зоны горения.

Процесс горения можно рассматривать как одноступенчатую «суммарную» реакцию между горючими газами, проступающими в зону горения из слоя горючего, и окислителем. Скорость реакции горения в общем

случае зависит от концентрации окислителя и давления, а также от интенсивности турбулентного перемешивания газовой среды в зоне горения. В первом приближении ее можно считать зависящей только от осредненной концентрации окислителя.

Температурное поле в зоне горения определяется процессами теплопроводности, лучистого переноса теплоты (в основном между частицами сажи) и свободной конвекции газов, а также лучистым теплообменом факела пламени с ограждающими поверхностями (при относительно не высоком уровне задымленности АП).

Зона двумерной конвекции. Определяющим здесь является процессы свободноконвективного теплопереноса в газовой среде, заполняющей объем аварийного помещения.

Для нахождения распределений по объему АП температуры и скоростей течения газа рассматривается при малых числах Маха нестационарное турбулентное движение вязкого сжимаемого и теплопроводного газа с эффективными теплофизическими характеристиками в плоскости расчетного сечения (в двумерном приближении). Плоскость расчетного сечения АП располагается вертикально в направлении основных конвективных потоков и проходит через центры очага пожара (зону горения) и проемов.

В данном случае свойство сжимаемости среды существенно проявляется вследствие значительных изменений температуры по объему аварийного помещения. Свободноконвективное движение газа развивается под действием подъемной силы, обусловленной разностью плотностей горячих и холодных газовых объемов. При работающей аварийной вентиляции оно «накладывается» на соответствующее вынужденное движение газа. Турбулентность течения учитывается с помощью полуэмпирической модели.

Математическое описание процессов, происходящих при развитии пожара в помещениях

Определяющим процессом является процесс термического разложения (для твердых органических или полимерных горючих, не образующих расплава) или испарения (для жидких горючих, а также для твердых горючих, образующих на нагреваемой поверхности расплав). Основной целью расчета в этом случае является определение состава и массовой скорости выхода газов с нагреваемой поверхности слоя горючего.

Математическое описание кинетики газообразования при нагреве элементарного объема органического вещества, например, древесины или полимера, строится на основе выбранной кинетической схемы процесса его термического разложения (пиролиза). Наиболее универсальной схемой является двухстадийная кинетическая схема вида:

M – исходный материал, $П$ – пирозоль, т.е. промежуточный конденсированный продукт пиролиза, образующийся из M в результате выделения газообразных продуктов $Г$ на 1-ой стадии; K – прококсованный остаток, образующийся из пирозоля на 2-ой стадии; k_1, k_2 – константы скоростей 1-й и 2-й стадий процессов пиролиза.

Для математического описания кинетики реакции данного вида можно воспользоваться достаточно отработанным аппаратом химической кинетики.

Наряду с дифференциальной моделью кинетики пиролиза, которая является универсальной по отношению к скорости нагрева пиролизующего материала, на практике целесообразно использовать и более простую интегральную модель. Согласно этой модели объемная скорость газовыделения определяется по формуле:

Где K – коксовое число материала, x – степень завершенности пиролиза

Зона горения. Основным фактором, влияющим на динамику пожара и определяющим его параметры, является интенсивность выделения теплоты при сгорании газов, поступающих в зону горения из зоны газификации

горючего. Она определяется как произведение массовой скорости горения и теплоты сгорания продуктов газификации горючего:

Массовая скорость горения пропорциональна массовой скорости поступления горючих газов и зависит от концентрации кислорода, давления и характеристик турбулентности газового потока в зоне горения.

Зоны двумерной конвекции. Для расчета движения газа при малых числах Маха, характерных для рассматриваемого случая (медленное течение газа), воспользуемся наиболее применяемыми на практике приближением Буссинеска или ЛМ-приближением, с помощью которых можно наиболее просто учесть выталкивающую силу при течении сжимаемой среды в поле сил тяжести. При этом, считается, что плотность газа меняется незначительно и не зависит от локальной температуры. ЛМ-уравнения представляют собой упрощенные уравнения Навье-Стокса для газа в предположении о малости числа Маха.

Локальное давление P представляется как сумма движущего давления p , изменение которого обусловлено только изменением скорости газа, и гидростатической составляющей

Отличающая особенность принятой схематизации уравнений Навье-Стокса заключается в том, что входящая в уравнение плотность считается не зависимой от локальной температуры, а давление имеет смысл движущего давления, т.е. составляющей давления, изменение которой обусловлено изменением скорости газа.

Давление в аварийном помещении рассчитывается по уравнению состояния:

где R – универсальная газовая постоянная; M – молекулярная масса газовой смеси, определяемая по ее текущему составу; T – среднеобъемная температура.

Основные положения методики расчета температурных полей.

Количественное решение задачи оптимизации состава и структуры огнезащиты можно только при наличии адекватной натуре математической модели ее функционирования, которая позволяет учитывать с достаточной точностью всю совокупность сложных процессов, происходящих в системе «огнезащита- объект» при пожаре.

Применение огнезащиты на основе плитных материалов является возможностью ее монтажа на отnose, позволяющая выравнивать поверхность строительных конструкций сложной конфигурации. В этих случаях между огнезащитой и защищаемой поверхностью образуются полости, заполненные воздухом и (или) паром, теплопередача через которые в условиях пожара осложняется влиянием естественной конвекции и излучения. Математическая модель функционирования огнезащиты должна учитывать теплопередачу в соответствующих зонах «огнезащита- объект».

Для исключения ошибок при проектировании оптимальных средств огнезащиты используемая математическая модель функционирования огнезащиты и построения на ее основе методика теплотехнического расчета конструкций с огнезащитой должны учесть:

- неоднородность структуры конструкций и неравномерность обогрева (охлаждения) их поверхности;
- влияние нагрева и термического разложения на теплофизические характеристики материала;
- влагоперенос и сопровождающие его тепловые эффекты испарения-конденсации влаги в системе «огнезащита - объект»;
- лучистые и конвективные переносы теплоты через прослойки, полости и отверстия в системе «огнезащита - объект», заполненные прозрачной для теплового излучения средой;

-притоки теплоты в объект огнезащиты через тепловые мосты (примыкающие конструкции, узлы крепления средства огнезащиты);

- результаты термического анализа, проводимого при идентификации огнезащитных составов в ходе испытаний по методике НПБ 236-97;

- отличия формы и размеров объекта огнезащиты от формы и размеров образцов, испытанных по методам НПБ- 236-897.

Математическая модель должна быть замкнутой, т.е. содержать в своем составе не только уравнения, описывающие сложный тепломассоперенос в конструкциях с огнезащитой, но и все необходимые формулы (замыкающие соотношения) для входящих в них коэффициентов переноса и параметров. Кроме того, должны быть определены параметры согласования модели с физическими экспериментами, консервативные к изменению формы, размеров и условий работы огнезащиты при переходе от эксперимента к натуре. Формулы для используемых в модели теплофизических характеристик материалов должны вытекать из принятого варианта уравнения теплопроводности (соответствовать ему).

Для обеспечения возможности количественной оптимизации огнезащиты математическая модель ее работы должна включать соотношения, связывающие теплофизические характеристики материала с его составом и структурой.

В связи с тем что математическая модель, а также разработанные на ее основе алгоритмы и программы численных расчетов используются при оптимальных расчетах огнезащиты (это, в частности, предполагает многократное повторение вариантов расчетов), она должна быть обоснованно упрощена. Однако при этом должна быть сохранена возможность учета с достаточной для практически точностью перечисленных выше факторов, осложняющих теплопередачу в системе «огнезащита - объект».

Достоверность математической модели должна быть подтверждена путем сопоставления результатов расчета с экспериментальными данными,

полученными в различных условиях, в том числе в условиях огневых испытаний по методике НПБ 236-97. При этом модель должна учитывать все особенности теплопередачи в условиях конкретных экспериментов, в частности, стоки теплоты из испытываемого образца в ограждающие конструкции огневой печи.

Математические модели теплопередачи в системе «огнезащита – конструкция»

Огнезащита из термостойких материалов.

К данному типу огнезащиты относят такие средства огнезащиты, как плиты из термостойких волокнистых материалов на неразлагающемся при высокотемпературном нагреве связующем или маты, в которых волокна соединены силами естественного сцепления, а также засыпки из вспученного вермикулита, перлита, керамзита, облицовки из кирпича.

При огневом воздействии в условиях пожара в огнезащите этого типа не происходит физико-химические превращения, форма и объем огнезащиты практически не изменяется. Огнезащитная способность последней обусловлена поглощением теплоты и уменьшением тепловых потоков от газовой среды пожара к поверхности защищаемой конструкции.

Прогрев слоя огнезащиты из термостойких волокнистых или пористых материалов происходит в нестационарном режиме. Теплота от обогреваемой поверхности слоя огнезащиты к необогреваемой передается теплопроводностью (кондукцией) по каркасу (скелету) материала, теплопроводностью по газу, заполняющему поры, и излучением.

На лучистый перенос теплоты через пористую или волокнистую огнезащиту влияет степень прозрачности для теплового излучения ее каркаса. В материалах с непрозрачным Каракасом лучистый перенос теплоты происходит за счет многократного обмена излучением между стенками пор,

имеющими различную температуру, через заполняющий поры газ, который в большинстве случаев можно считать прозрачным для теплового излучения.

В волокнистых слоях существенную роль играет рассеяние излучения на волокнах, имеющих форму, близкую к цилиндрической, и хаотично ориентированных в пространстве. Поэтому оптические характеристики таких слоев зависят от ориентации волокон и распределения их по размерам.

Между различными механизмами переноса теплоты в пористых и волокнистых материалах существует взаимное влияние. Характер мгновенного распределения температуры по толщине слоя огнезащиты, обусловленный теплопроводностью, изменяется под влиянием излучения и конвекции. В свою очередь температура каркаса влияет на интенсивность этих процессов.

Кондуктивный перенос теплоты в порах осуществляется за счет обмена кинетической энергией при столкновениях движущихся молекул газа между собой и с твердой поверхностью, ограничивающей поры (поверхность волокон, зерен). В общем случае эффективная теплопроводность газовой среды, заполняющей поры, зависит от длины свободного пробега молекул газа при данных давлениях и температуре.

Движущей силой свободноконвективного течения в слое волокнистой огнезащиты, проницаемой для газа, является подъемная сила, направленная вертикально вверх и зависящая от перепада температуры между поверхностями, ограничивающими слой. На поле скоростей газа в слое влияют его вязкость и проницаемость огнезащиты.

В случае пористой (волокнистой) огнезащиты используются допущение о равенстве температур каркаса и газа, заполняющего поры. Кондуктивная теплопроводность пористого (волокнистого) огнезащитного материала с неразлагающимся при нагреве каркасом является функцией теплопроводностей каркаса ($\lambda_{\text{каркаса}}$), газа, заполняющего поры, ($\lambda_{\text{газа}}$) и пористости (ϵ):

Вид функции зависит от выбранной модели внутренней структуры пористого материала.

С точки зрения теплопередачи огнезащита в этом случае рассматривается как квазиоднородная среда с эффектными теплофизическими характеристиками. С учетом того, что объемная теплоемкость газа, заполняющего поры, много меньше объемной теплоемкости каркаса, а выражение для вектора теплового потока имеет вид, дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности в огнезащите этого типа может быть представлено в виде:

Где, c , ρ - теплоемкость и плотность каркаса.

Расчет пределов огнестойкости конструкций по универсальной методике

Для исключения ошибок при расчетах огнестойкости и проектирования средств огнезащиты используемая методика статистического расчета должна удовлетворять следующим требованиям:

1. При раздельном рассмотрении элементов конструкций учитывать их взаимодействие друг с другом и с основанием.
2. В статически неопределимых системах учитывать дополнительные усилия, возникающие вследствие температурных деформаций.
3. Учитывать неравномерное распределение температуры по сечению конструкции и ее влияние на физико - механические характеристики материалов.
4. Жесткость элементов конструкций определять с учетом неупругих деформаций.

При проведении расчетов нагрузки следует принимать в соответствии с конкретным проектом здания или сооружения, в котором будет применяться строительная конструкция. Согласно требованиям СНиП 2.01.07-85 допускается учитывать лишь нормативные значения постоянных и длительных нагрузок.

Центрально-растянутые элементы конструкций.

Расчетная схема охватывает конструкции колонн, стоек и прямолинейные элементы, подверженных действию растягивающихся или сжимающих усилий, линия действия которых совпадает с осью элемента.

Предел огнестойкости центрально-растянутых (сжатых) стержней устанавливается по времени от начала симметричного обогрева их боковой поверхности до момента:

- потери прочности (для растянутых);
- потери прочности или устойчивости (для сжатых).

Прочность опасного сечения центрально-растянутых и центрально-сжатых элементов от совместного воздействия нагрузки и симметричного обогрева их боковой поверхности проверяется из условия:

$$N \leq R_d A$$

где N - продольная сила, действующая в сечении ; A – площадь сечения;
 $R_d = R / \gamma_c$ - нормативные сопротивления материалов конструкции при растяжении (сжатии), сниженные с учетом нагрева; R - нормативное сопротивление материала при нормальной температуре; γ_c - коэффициент условий работы материала, учитывающий изменение его прочностных характеристик в зависимости от температуры.

Изгибаемые элементы конструкций. К таким относятся конструкции балок, ригелей и др., в поперечных сечениях которых возникают изгибающие моменты.

Предел огнестойкости стержней устанавливается по времени от начала обогрева их боковой поверхности до момента потери прочности опасного

сечения изгибаемых элементов конструкций от совместного воздействия нагрузки и высокой температуры и проверяется из условия:

$$M \leq R_y A$$

где M – изгибающий момент, действующий в сечении; y – координата, отсчитываемая от нейтральной оси сечения вдоль главной оси инерции, лежащей в плоскости изгиба; A – площадь сечения; R_y – нормативное сопротивление материалов конструкции при растяжении (сжатии), сниженные с учетом нагрева.

Расстояние нейтральной оси сечения от его нижнего края:

$$y = I_x / I_x$$

где

Модуль упругости материала, сниженный с учетом нагрева вычисляется по формуле:

$$E = E_0$$

где E_0 – модуль упругости при начальной температуре; α – коэффициент условий работы материала, учитывающий изменение модуля упругости в зависимости от температуры.

Интегралы в формулах берутся численно с использованием распределения температуры в рассматриваемом сечении, полученного в теплотехнической части расчета.

В случае неоднородных конструкций интегралы в формулах представляются в виде суммы интегралов, каждый из которых берется по площади однородного фрагмента сечения (для железобетонных конструкций – по бетону и по стальной арматуре).

Расчет пределов огнестойкости металлических конструкций с использованием понятия «критическая температура»

Данный упрощенный подход к расчету пределов огнестойкости основан на следующих допущениях.

1. В каждый момент времени температура распределена по сечению элемента конструкции равномерно.

2. Предельным состоянием элемента конструкции является состояние, при котором напряжения, действующие в наиболее удаленных от нейтральной оси точках, достигают предела текучести материала.

3. К рассматриваемому элементу конструкции может быть применена одна из статистических расчетных схем: «центральное сжатие (растяжение)», «поперечный изгиб», «продольный изгиб».

Основные расчетные случаи:

- центрально- сжатые (растянутые) стержни, Равномерно обогреваемые по боковой поверхности;
- изгибаемые и внецентренно- нагруженные стержни, равномерно обогреваемые по боковой поверхности.

Центрально- сжатые (растянутые) стержни, равномерно обогреваемые по боковой поверхности. Предел огнестойкости данных стержней, равномерно обогреваемые по боковой поверхности, устанавливается по времени (в мин) от начала обогрева до момента прогрева их сечения до критической температуры.

Критическая температура центрально- сжатых стержней определяется из условий потери прочности или устойчивости. С учетом допущения 1 эти условия представляются в виде:

$$\begin{aligned} &= N/(R A) \\ &= N l /(\pi E I \quad) \end{aligned}$$

Зависимость от температуры коэффициентов α и β приведена в табл.

За критическую температуру центрально- сжатого стержня принимается наименьшее из двух найденных по табл. Значений

температуры, соответствующих значениям коэффициентов α и β , определенных по выше приведенным формулам.

Критическая температура центрально-растянутых стержней определяется по табл. в зависимости от коэффициента α , вычисленного из условия потери прочности.

Изгибаемые и внецентренно – нагруженные стержни, равномерно обогреваемые по боковой поверхности. Предел огнестойкости изгибаемых и внецентренно – нагруженных стержней, равномерно обогреваемых по боковой поверхности, устанавливается по времени (в мин) от начала обогрева до момента прогрева их сечения до критической температуры.

Критическая температура изгибаемых стержней определяется из условий потери прочности, которое с учетом допущений 1 и 2 представляется в виде:

$$= M / (W R)$$

где W – момент сопротивления сечения.

Критическая температура внецентренно - сжатых стержней определяется из условия потери прочности или устойчивости. С учетом допущений 1 и 2 условие потери прочности представляется в виде:

$$= N e / (R W) + N / (R A)$$

За критическую температуру внецентренно - сжатого стержня принимается наименьшее из двух найденных по табл. Значений температуры, соответствующих значениям коэффициентов α и β , определенных по выше приведенным формулам.

Критическая температура внецентренно – растянутых стержней определяется по табл. В зависимости от коэффициента, вычисленного из условия потери прочности.

Использование при расчетах требуемых толщин огнезащиты металлических конструкций понятия «критическая температура металла» существенно сокращает трудоемкость расчетов, так как дает возможность

разделить решения теплотехнической и статической частей задачи. В этом случае вначале для рассматриваемой конструкции определяется значение критической температуры, а затем проводятся расчеты температурных полей в конструкциях с выбранным средством огнезащиты.

СПОСОБЫ И СРЕДСТВА ОГНЕЗАЩИТЫ

В настоящее время для огнезащиты строительных конструкций используют следующие способы:

- 1) обетонирование, оштукатуривание, обкладка кирпичом (конструктивный способ);
- 2) облицовка объекта огнезащиты плитными материалами или установка огнезащитных экранов на отnose (конструктивный способ);
- 3) нанесение непосредственно на поверхность объекта огнезащитных покрытий (окраска, обмазка, напыление и т.п.);
- 4) комбинированный (композиционный) способ, представляющий собой рациональное сочетание различных способов.

Основными компонентами средств огнезащиты являются термостойкие заполнители (в том числе, пористые или волокнистые) и вяжущие (как правило, неорганические). Классификация и свойства искусственных пористых и волокнистых заполнителей, используемых для приготовления бетонов различного назначения, подробно рассмотрены в работах, а достаточно полные сведения об используемых в строительстве минеральных вяжущих приведены в работах [14, 39]. Здесь мы рассмотрим состав и основные свойства типичных представителей этих материалов, наиболее эффективных для использования в средствах огнезащиты¹. Эти данные необходимы для разработки рецептур и определения теплофизических характеристик огнезащитных материалов.

МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СРЕДСТВ ОГНЕЗАЩИТЫ

Вспученный перлит. Вспученный перлит представляет собой пористый материал, получаемый из природных вулканических водосодержащих стекол (перлита, обсидиана и др.). В зависимости от размера частиц его подразделяют на песок и щебень.

Перлитовый песок (ГОСТ 10832 — 74), так же в зависимости от размеров частиц, подразделяют на мелкий — частицы размером до 1,2 мм и крупный — частицы от 1,2 до 5 мм. Вспученный перлитовый щебень выпускается двумя фракциями: мелкий с зернами размером от 5 до 10 мм и крупный с зернами размером от 10 до 20 мм.

Перлитовый щебень применяют в качестве крупного заполнителя в бетонах огнезащитного назначения. Основные характеристики выпускаемых промышленностью перлитового песка и щебня представлены в табл. 2.1. По способности поглощать влагу из атмосферы вспученный перлит относится к числу материалов, инертно сорбирующих влагу (его равновесная сорбционная влажность не превышает 1,5 %).

Вспученный перлитовый песок применяют: в качестве заполнителя в растворах, используемых для изготовления огнезащитных штукатурок; как мелкий заполнитель в бетонах огнезащитного назначения; в составе огнезащитных покрытий и плит; для теплоизоляционных (огнезащитных) засыпок при температурах до 1000 °С.

Сырьем для производства вспученного перлита служат кислые алюмосиликатные породы вулканического происхождения, способные при нагревании вспучиваться — перлит, пехштейн, обсидиан, витрофир и др. Поскольку технология переработки и условия применения вспученного материала из перечисленных разновидностей пород отличаются

незначительно, все вспучивающиеся породы на практике условно объединяют под общим названием «перлиты». Их основной особенностью является способность к многократному увеличению первоначального объема при тепловой обработке. Вспучиваемость определяет эффективность использования этих пород для получения пористых заполнителей.

Таблица 1

Основные характеристики вспученного перлита

Показатель	Марка песка				Марка щебня			
	100	150	200	250	300	400	500	600
Насыпная плотность в сухом состоянии, кг/м ³ , не более	100	150	200	250	300	400	500	600
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее	—	—	—	—	589	986	1569	—
Теплопроводность в сухом состоянии при температуре 25±5 °С, Вт/(м·К)	0,052	0,058	0,064	0,07	—	—	—	—
Влажность, % по массе, не более	2	2	2	2	2	2	2	2
Потеря в массе после 15 циклов попеременного замораживания и оттаивания, %, не более	—	—	—	—	10	10	10	10

Параметры процесса вспучивания и технология получения легких пористых заполнителей на основе перлита зависят от струк-

туры и физико-химических свойств разновидностей перлитовых пород. Наиболее важное значение имеет химический состав породы. Как видно из

табл. 2.2 [137], перлиты различных месторождений характеризуются сравнительно близким химическим составом.

Вспученный вермикулит. Согласно ГОСТ 12865 — 67 вспученные вермикулиты в зависимости от размера зерен делятся на следующие фракции: крупный — зерна от 5 до 10 мм; средний — от 0,6 до 5 мм; мелкий — до 0,5 мм. Основные характеристики выпускаемого промышленностью вспученного вермикулита приведены в табл. 3.

Аналогично вспученному перлиту вспученный вермикулит применяют в качестве заполнителя при изготовлении огнезащитных материалов, а также в качестве теплоизоляционных засыпок, длительно работающих при температурах до 1100 °С.

Вермикулит является наиболее термостойким из всех минеральных заполнителей, применяемых в огнезащите. Его огнеупорность составляет 1270 — 1430 °С. Поэтому применение вермикулита предпочтительно в огнезащите, предназначенной для работы в высокотемпературных продуктах горения, например, углеводородных топлив.

Сырьем для производства вспученного вермикулита служит минерал, образовавшийся в результате гидратации биотитовых или флогопитовых слюд. Его средний состав отвечает формуле $22\text{MgO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 22\text{SiO}_2 \cdot 40\text{H}_2\text{O}$.

Таблица 2. Химический состав перлитов

Месторождение	Содержание, %							Потеря массы, %, при прокаливании до	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O+Na ₂ O	100 °C	1000 °C
Читинская обл.: Закультинское	69,01–71,14	11,37–13,1	2,4–3,43	2,3–3,2	0,63–0,03	0,02–5,27	4,07–3,63	3,18–3,63	6,34–6,92
Приморский край:									
Малазовское	74,28	12,78	2,4	0,7	0,36	0,06	5,66	0,21	2,54
Тахобинское	69,76	14,22	2,33	1,85	1,6	0,05	4,16	—	5,13
Богопольское	72,33–73,33	12,97–13,37	1,25–1,35	0,18–0,93	0,46–0,51	0,12–0,27	3,45–4,51	—	5,4–7,43
Бурятия: Мухор-Талинское	70,5	15,22	1,48	0,8	0,43	0,24	6,39	1,9	4,94
Кабардино-Балка- рия:									
Заюковское	69,32–71,48	14,14–14,9	1,1–1,89	1,6–1,5	0,1–0,03	Следы	8,04–2,54	1,24–0,71	9,02–4,21
Украина:									
Береговское	72,7	12,37	1,13	1,0	0,25	0,28	5,77	—	6,32
Ардовское	72	15	1,4	2,2	0,36	Следы	5,7	0,18	3,34
Хайешское	71,12–71,54	15,71–17,41	1,1–1,19	0,4–3,0	0,25–0,36	—	1,97–3,19	0,98–6,0	5,3–7,14

Таблица 3

Основные характеристики вспученного вермикулита

Показатель	Марка		
	100	150	200
Насыпная плотность, кг/м ³	100	150	200
Теплопроводность, Вт/(м·К), не более, при средней температуре:			
25 ± 5 °C	0,064	0,070	0,076
325 ± 5 °C	0,151	0,157	0,163
Влажность, % по массе, не более	3	3	3

Сохраняя внешний вид слюды, вермикулит отличается от биотита и флогопита малой эластичностью и пониженной твердостью. Его плотность находится в пределах от 2,05 до 2,71 кг/м³, а температура плавления достигает 1300 °С. Состав вермикулита различных месторождений и параметры выхода воды при прокаливании даны в табл. 4 [86]. Как можно видеть, наибольшую потерю массы при прокаливании имеет вермикулит Ковдорского месторождения, что обуславливает его наибольшее по сравнению с другими вермикулитами вспучивание. Из сравнения данных табл. 2. и 4 следует, что в вермикулите содержится значительно больше окиси магния и меньше двуокиси кремния, чем в перлите. Это оказывает соответствующее влияние на различие в их теплофизических свойствах.

В связи с тем что процесс вермикулитизации происходит постепенно, отдельные образцы породы, даже взятые с одного участка месторождения, имеют разную степень гидратации и различный химический состав. Основные физико-технические свойства минералов группы гидрослюд после термообработки приведены в табл. 5.

Зерна вермикулита сложены из пакетов слюдяных частиц, между которыми располагаются гидратные слои. При быстром нагревании вермикулита до температуры, превышающей 150 °С (обычно 800 — 900 °С), вода гидратных слоев переходит в парообразное состояние, что сопровождается образованием значительного внутреннего давления паров воды и расширением зерен вермикулита в направлении, перпендикулярном плоскостям спайности. Степень вспучивания вермикулита зависит от количества гидратной воды и скорости нагрева частиц при их вспучивании.

Таблица 4

Химический состав гидрослюд и вермикулитов различных месторождений

Место- рождение	Тип минерала	Содержание, %												Потеря мас- сы при про- каливании, %
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	MnO	NiO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	
Африкан- довское	Слабовермикулити- зированный биотит	38,83	3,71	14,72	4,16	7,41	2,43	20,16	—	—	1,31	5,64	—	2,02
	Вермикулит	37,32	3,33	12,24	8,24	2,00	7,25	20,94	0,12	—	0,19	1,09	Следы	7,97
Булдым- ское	Гидробиотит	40,58	2,08	10,60	13,58	5,35	0,61	16,20	—	—	0,51	7,60	—	2,59
	Сильновермикули- тизированный био- тит	40,27	1,53	12,34	7,81	3,81	0,76	22,47	—	—	0,81	5,83	—	3,76
Ковдор- ское	Флогопит	39,19	2,15	14,40	2,79	3,78	Нет	23,94	—	—	0,35	11,50	Следы	1,51
	Гидрофлогопит	39,15	1,85	15,70	3,43	3,42	0,42	25,35	—	—	1,15	5,47	—	4,87
	Вермикулит	38,62	0,8	12,15	6,29	0,62	1,82	27,76	—	—	Следы	0,44	—	11,82
Саланлат- винское	Биотит	33,42	3,85	13,19	9,32	20,81	0,28	5,13	—	—	0,35	9,57	Нет	1,23
	Гидробиотит	35,64	3,02	11,55	4,01	12,12	1,12	9,84	—	—	0,55	6,82	—	5,11
	Сильновермикули- тизированный био- тит	36,42	2,52	10,10	20,36	2,25	1,39	13,65	—	—	0,63	4,96	—	8,48

При медленном нагреве часть воды в виде пара выходит через трещины спайности, не производя работы вспучивания.

Вермикулит вспучивается только в направлении, перпендикулярном плоскостям спайности, причем его зерна часто приобретают зигзагообразную форму. Такой характер вспучивания объясняется в основном тем, что зерна имеют, как правило, неодинаковую степень вермикулитизации на отдельных участках, а следовательно, и разную способность к вспучиванию. Этому способствуют и механические повреждения зерен, наличие включений и т.п. Поскольку связь между отдельными чешуйками зерен значительной длины в некоторых местах оказывается слабой, они легко ломаются, превращаясь в

зерна кубообразной или пластинчатой формы.

Вспучивание вызывается в основном водой, способной удаляться из вермикулита при сравнительно низких температурах (до 300 — 400 °С). На вспучивание также оказывает влияние и кристаллическая вода, выделяющаяся при температуре выше 750 °С при продолжительном нагревании.

Особенности структурного строения зерен вермикулита, нарушение контактов между отдельными их пластинками в процессе вспучивания обуславливают легкое разрушение зерен уже при незначительном механическом воздействии, что часто затрудняет использование вспученного вермикулита в составах масс, наносимых пневмоспособом. Основную трудность при этом представляют образование большого количества пылевидной фракции и резкое увеличение удельной открытой поверхности заполнителя. Одним из эффективных способов повышения физико-механических характеристик слоя, нанесенного пневмоспособом, является предварительная пропитка зерен вермикулита клеящим материалом с последующей сушкой или даже частичным оплавлением. В качестве клеящего материала могут быть использованы глиняный шликер, раствор карбоксилметилцеллюлозы (КМЦ), битуминозное связующее петролатум, растворимое стекло и другие вещества.

Таблица 5

**Основные физико-технические свойства минералов группы
слюд после вермикулитизации**

Место-рождение	Тип минерала	Цвет	Плотность, г/см ³	Твердость по Моосу	Содержание свободной воды, %	Объемный коэффициент вспучивания
Африкан-довское	Слабовермикулитизированный биотит	Черно-фиолетовый	2,86	2 — 3	2,5	2,05
	Вермикулит	Светло-серый	2,41	1	9,42	6,1
Булдымское	Гидробиотит	Коричневый	2,65	2	1,39	3,75
	Сильновермикулитизированный гидробиотит	Золотистый	2,38	1	2,62	6,15
Ковдорское	Флогопит	Серебристый	2,84	3	0,84	1,65
	Гидрофлогопит	Серо-черный	2,74	2 — 3	5,11	4,6
	Вермикулит	Золотистый	2,55	1 — 2	11,4	6,55
Саланлатвинское	Биотит	Серо-коричневый	2,92	2 — 3	1,08	1,4
	Гидробиотит	Темно-коричневый	2,52	1 — 2	3,44	3,65
	Сильновермикулитизированный гидробиотит	Светло-коричневый	2,32	1	8,78	5,9

Керамзит. Керамзит — это искусственный легковесный материал мелкопористого строения, получаемый вспучиванием при обжиге силикатных пород (глин, сланцев) или зол тепловых электростанций. Вспученные зерна керамзита имеют округлую (керамзитовый гравий) или гравелистую (керамзитовый щебень) форму. Поверхностная корка зерен представляет собой спекшуюся шероховатую оболочку.

В зависимости от размера зерен керамзит подразделяют на гравий частицы размером от 5 до 40 мм, мелкий песок — до 1,2 мм и крупный песок — от 1,2 до 5 мм [137].

В зависимости от насыпной плотности различают керамзитовый гравий следующих марок [49]: особо легкий — плотность до 250 кг/м^3 ; легкий — $250 \dots 500 \text{ кг/м}^3$; средний — $500 \dots 600 \text{ кг/м}^3$;

тяжелый — более 600 кг/м^3 .

Основными требованиями к керамзитовому сырью являются его однородность, а также способность к вспучиванию и порообразованию в условиях скоростного (форсированного) обжига при огнеупорности не более 1350°C . Коэффициент вспучивания глин и сланцев при обжиге должен быть не менее 2, температура вспучивания глинистого сырья не должна превышать $1200 \text{ — } 1250^\circ\text{C}$, температурный интервал вспучивания сырья при обжиге должен быть не ниже 50°C .

Химический, гранулометрический и минералогический составы глинистого сырья не регламентируются. Содержание отдельных компонентов (в %) находится в пределах [137]: SiO_2 — до 70; Al_2O_3

12-23; $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ - 6-10; $\text{CaO} + \text{MgO}$ - 3-8; MnO - до 3- 4; $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ — 2,5—5; свободный кремнезем — до 25.

Желательной примесью в керамзитовом сырье являются тонкодисперсные органические вещества в количестве 1 — 2 %, повышающие степень вспучивания. При меньшем их содержании необходимо вводить в сырье искусственные добавки (в %): телезит руды (пылевидный) 2 — 4; охристую и огнеупорную глины 10 — 20; пиритные огарки 2 — 4; древесные опилки 2 — 4; каменный уголь (молотый) 1 — 2; соляровое масло, мазут 1 — 3.

Глины вспучиваются лишь в том случае, если их масса приведена в состояние определенного размягчения, характеризующегося оптимальной вязкостью, при одновременном выделении равномерно распределенных

газообразных продуктов, способных произвести работу по расширению глины.

Кинетика газовыделения при обжиге керамзита представлена в табл. 6 . Из данных таблицы видно, что основная масса газов выделяется при температурах до 900 °С. Вспучивание в среде азота существенно больше, чем в среде воздуха. Расчеты показывают, что для эффективного вспучивания глины требуется ничтожно малое количество исходного вещества, поставляющего ту или другую газопарообразную фазу в момент парообразования. Особо важным является интервал температур, внутри которого происходит уменьшение кристаллической и нарастание жидкой фазы. Такой интервал можно назвать интервалом размягчения. Чем шире интервал размягчения, тем благоприятнее условия для вспучивания.

Таблица 6

**Кинетика газовыделения при обжиге керамзита
(скорость нагревания 50 °С/мин)**

Порода	Среда обжига и добавки	Общая потеря массы	Потеря массы, % к общей ее потере, при температуре, °С					Характеристика обожженных образцов	
			до 400	от 400 до 900	итого до 900	от 900 до 1100	от 1100	Объемная масса в куске, г/см ³	Коэффициент вспучивания
Суглинок: лосиноостровский	Воздух	100	47,3	45,9	93,2	4,28	2,52	1,45	1,33
	Азот	100	47,7	46,5	94,2	3,58	2,37	0,72	2,60
	В среде азота: соляровое масло 1% + пиритные огарки 2 %	100	40,4	47,8	88,2	8,02	3,78	0,80	3,42
	соляровое масло 1% + пиритные огарки 3 %	100	35,9	45,5	81,4	8,04	10,56	0,25	7,25
красноярский	Воздух	100	46,7	42,1	88,8	6,72	4,48	1,10	1,70
	Азот	100	46,6	43,9	90,5	5,79	3,71	0,81	2,34
Волжская глина	Воздух	100	37,5	42,2	79,7	11,57	8,73	1,44	1,29
	Азот	100	29,1	41,7	70,8	19,56	9,64	0,64	3,02

По мере нагревания материала до 900 — 1000 °С общая пористость при изменяющемся характере распределения пор по размеру сначала непрерывно растет, а затем, при спекании, резко падает. Важно отметить, что общая пористость уменьшается в основном за счет более крупных пор при возрастающем количестве мельчайших.

Минеральные волокна. Минеральное волокно, представляющее собой гибкое протяженное тело, длина которого значительно превосходит его толщину, является основой любой волокнистой системы. В зависимости от длины волокна разделяют на штапельные и непрерывные. Средняя толщина волокон обычно лежит в пределах 1 — 50 мкм. В соответствии с ГОСТ 10878—70 толщину подокон обозначают в тексах, имеющих размерность ML^{-1} (г/км). Несколько волокон большой длины, собранных в пучок, образуют нить. В зависимости от характера переплетения и числа сложений нити ткань может иметь различную конфигурацию поверхности. Непосредственно из волокон изготавливают маты, войлок, холсты, штапельные ткани.

Волокнистые композиции с низкой теплопроводностью относятся к числу лучших теплоизоляторов.

Благодаря низкой стоимости наиболее широкое применение в производстве огнезащиты нашли материалы на основе силикатных волокон (минеральной ваты). Среди природных сырьевых материалов более пригодными для производства минеральной ваты следует считать горные породы, химический состав которых наиболее близок к химическому составу силикатных волокон. Важнейшими показателями таких горных пород являются :

- * Соотношение (% по массе) $(SiO_2 + Al_2O_3)/(CaO + MgO) = 2,5...0,5$
при $SiO_2/Al_2O_3 > 3$, $CaO/MgO > 0,5$
- * Температура плавления не выше 1400 °С;
- * Вязкость расплава при 1440 °С не более 1 Пас.

Лучшим природным сырьем для производства силикатных волокон являются:

* Изверженные породы — базальты, диабазы, габбро и другие базиты, а также ультрабазиты, обогащенные CaO;

* Метаморфические породы — амфиболиты, известняки, сланцы, волластонитовые породы и скарны, образовавшиеся за счет доломитов и известняков;

*Осадочные породы — мергели, глинистые либо окаменелые доломиты и известняки (мел).

Природное сырье используется как для ваграночного, так и для ванного способа получения силикатного расплава.

Применение природного сырья для производства минеральных волокон требует тщательного подбора компонентов шихты по химическому составу. Для облегчения плавления шихты из природного сырья в ее состав вводят окислы CaO и MgO (наиболее часто — в виде доломитов и известняков). Наилучшим сырьем для производства минеральных волокон, особенно в ваграночном процессе их получения, являются горные породы группы габбро-базальтов и другие изверженные базиты и ультрабазиты. Средний химический состав наиболее распространенных и наиболее часто применяемых разновидностей этих пород весьма схож (табл. 2.7).

Как видно из таблицы, габбро отличается от базальтов и диабазов большей степенью раскристаллизованности, поскольку представляет собой продукт медленного остывания базальтовой магмы. Базальты и диабазы различаются только по геологическому признаку — по форме ими сложенных природных тел. Среди изверженных горных пород ультрабазиты наиболее близки к промышленным силикатным волокнам по соотношению $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{CaO} + \text{MgO})$. Однако для этих пород зачастую характерно низкое содержание Al_2O_3 и CaO. Поэтому они имеют относительно высокую температуру плавления (более 1500 °C) и для производства силикатного волокна могут применяться лишь совместно с другими легкоплавкими материалами.

Минеральная вата, содержащая большое количество *диабаз*а или *базальта*, отличается малым диаметром (5 — 7 мкм) и высокой эластичностью волокон. Ее главной особенностью является долговечность, поскольку она практически инертна к воздействию воды и слабых кислот, так как имеет высокое соотношение $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{CaO} + \text{MgO})$. Химический состав такой минеральной ваты приведен в табл. 2.8.

Из сравнения данных табл. 2.7 и 2.8 следует, что увеличение доли *диабаз*а в составе минеральных волокон соответствует повышению содержания SiO_2 и снижению содержания CaO .

В настоящее время отечественная промышленность, кроме минеральных волокон, выпускает волокна из других материалов. Создание волокнистых материалов на основе окиси алюминия и кварца позволило повысить уровень рабочей температуры до 1000 — 1200 °С. Паспортные характеристики некоторых волокон на основе двуокиси кремния приведены в табл. 9.

Таблица 7

Химический состав габбро, диабазов и других изверженных базитов и ультрабазитов, применяемых и перспективных для производства силикатного волокна

Горная порода, месторождение	Содержание, % по массе						Потери при прокаливании
	SiO ₂	Al ₂ O ₃ +TiO ₂	Fe ₂ O ₃ +FeO	CaO	MgO	R ₂ O	
Средний состав:							
базальты	49,1	17,1	11,7	9,0	6,2	4,6	1,6
диабазы	50,5	16,8	11,6	8,9	5,8	4,0	1,8
габбро	48,2	18,8	9,1	11,0	7,5	3,4	1,5
Диабаз, Учалинское мест-е (Башкирия)	51,5	23,5	9,5	7,6	7,4	—	—
Диабаз, Буготакское мест-е (Новосибирская обл.)	53,8	15,3	13,4	8,3	3,4	4,7	—
Диабаз, Ачинское мест-е (Красноярский край)	47,6	13,7	15,9	13,1	6,7	1,6	—
Долерит, Усть-Нюринское мест-е (Иркутская обл.)	46,8	15,4	6,7	11,8	5,7	1,7	1,5
Габбро-диабаз, мест-е «Гора Змеевая» (Екатеринбургская обл.)	46,9	22,2	11,0	11,3	4,8	3,2	—
Габбро-диорит, Ломовское мест-е (Екатеринбургская обл.)	49,5	15,2	6,6	9,8	5,8	3,0	—
Базальт, Булатовское мест-е (Архангельская обл.)	47,2	11,4	12,0	9,8	15,9	1,6	2,0
Базальт, Берестовенское мест-е (Украина)	49,9	17,3	15,7	10,5	5,5	2,9	до 2
Андезит-базальты, мест-е «Иванова долина» (Украина)	50,1	16,1	14,5	9,4	5,3	2,8	1,4
Базальт выветрелый, Камышевское мест-е (Украина)	47,7	19,6	11,7	6,0	4,2	7,5	3,2
Базальт, Волновахское мест-е (Украина)	43,3	18,6	14,2	12,0	5,9	2,6	3,1
Базальт, Умфен (Германия)	47,2	17,4	10,2	9,4	10,0	4,0	—
Базальт, Линц-на-Рейне (Германия)	46,0	19,0	13,0	11,0	3,0	8,3	—

Таблица 8

Химический состав минеральной ваты, полученной при ваграночной плавке шихт с базальтом и диабазом

Предприятие, фирма	Содержание, % по массе						$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$
	SiO_2	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ti}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO}$	CaO	MgO	R_2O	$\text{CaO} + \text{MgO}$
<i>Базальта или диабаз более 75 %</i>							
«Роквул» А/Б (Швеция)	48,1	16,8	7,3	17,4	7,0	2,8	2,66
Завод в Ст.Эгидиен (Германия)	48,8	12,3	—	9,9	12,4	—	2,74
<i>Базальта или диабаз 75 — 20 %</i>							
Экспериментальная база ВНИПИ «Теплопроект»	41,5	12,5	4,0	25,5	4,5	0,5	1,41
Тайгинский ЗМИ	39,2	14,6	5,6	33,1	2,8	—	1,50
Чимкентский асбоцементкомбинат	40,0	14,4	3,7	27,0	3,6	0,2	1,78
Кураховский ЗМВиК	40,1	14,3	5,2	35,8	2,9	—	1,43
<i>Базальта и диабаз менее 20 %</i>							
Киевский комбинат «Стройиндустрия»	40,5	10,3	3,0	31,9	3,4	—	1,23
Харьковский ЗИиАМ	40,4	11,3	2,8	39,2	2,4	—	1,24

Паспортные характеристики каолинового, кремнеземистого и кварцевого волокон

Волокно	Температура, °C		Химический состав, %				
	рабочая	огнеупорная	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	B_2O_3
Каолиновое	800—1000	1840	50—55	45—50	0,5—1,5	0,1—0,5	0,1—0,3
Кремнеземистое	1000—1200	1700	92—95	2—4	0,5—1,0	0,1—0,5	0,2—0,8
Кварцевое	1100—1200	1720	99,7	0,5	0,15	0,05	—

Таблица 9

Исходным сырьем для каолинового волокна служит природная каолиновая глина — доступный и дешевый материал.

По химическому составу и рабочим температурам кремнеземистое и кварцевое волокна близки между собой, однако стоимость последнего значительно выше из-за высоких требований к чистоте сходного материала.

Неорганические вяжущие вещества. Эти вяжущие вещества делятся на воздушные, гидравлические и кислотоупорные. *Воздушными вяжущими* называют материалы, обладающие способностью твердеть и сохранять свою прочность только на воздухе (например, гипс). *Гидравлические вяжущие* вещества способны твердеть и | охранять прочность не только на воздухе, но и в воде. К числу основных гидравлических вяжущих веществ относятся портландцемент, пуццолановые и шлаковые цементы, а также глиноземистый цемент. *Кислотоупорные вяжущие* вещества набирают и сохраняют определенную прочность только в среде, в которой присутствуют минеральные кислоты (но не в щелочной среде и не в воде). В группу кислотоупорных вяжущих входят различные виды жидкого стекла.

Огнезащитные составы изготавливают как на порошкообразных вяжущих материалах, так и на жидких связующих. Применение порошкообразных вяжущих создает определенные удобства для одновременного приготовления масс, увлажняемых при нанесении водой или другой увлажняющей жидкостью (например, глиняным шликером).

Гипсовые и ангидритовые вяжущие вещества. Это наиболее эффективные в технико-экономическом отношении вяжущие вещества, особенно по удельным затратам сырья, топлива, электроэнергии и труда на единицу продукта. Неограниченны и запасы исходного природного сырья, а также побочных гипсосодержащих материалов, образующихся на предприятиях химической промышленности.

Гипсовыми вяжущими веществами называют состоящие из полуводного гипса порошковидные материалы, получаемые обычно Шиловой обработкой двуводного гипса в пределах 105 — 200 °С.

При термообработке двуводного гипса в паровой среде под «пилением в автоклавах или в водных растворах некоторых солей при атмосферном

давлении образуется α -полуводный сульфат кальция (гипсовое вяжущее α). При обжиге сырья при 140 — 180 °С получают β -полуводный сульфат кальция (гипсовое вяжущее β). К группе гипсовых вяжущих относится также вяжущее, получаемое без термообработки тонким измельчением двухводного гипса с активизаторами твердения.

Ангидритовые вяжущие изготавливают обжигом двухводного гипса при 600—950 °С. Они почти целиком состоят из ангидрита — безводного сульфата кальция CaSO_4 . Различают низкообжиговое ангидритовое вяжущее (ангидритовый цемент П.П. Будникова), получаемое обжигом двуводрата при 600 — 750 °С, и высокообжиговое, получаемое обжигом при 800 — 950 °С и называемое иногда эстрихгипсом [189]. Кроме того, ангидритовое вяжущее можно производить без термообработки тонким измельчением природного ангидрита с добавкой активизаторов твердения.

Гипсовые вяжущие по традиции с некоторой условностью, отвечающей практическим целям, разделяют: на строительный гипс, состоящий из р-модификации полугидрата; формовочный гипс того же состава с повышенными техническими свойствами; технический (высокопрочный) гипс, состоящий из полуводного гипса.

Для производства гипсовых и ангидритовых вяжущих веществ в качестве сырья применяют природные двухводный гипс, ангидрит, глиногипс, а также отходы промышленности, состоящие в основном из двухводного или безводного (а иногда и полуводного) сернокислого кальция или их смеси (фосфогипс, борогипс, фторогипс и др.).

Природный двухводный гипс — горная порода осадочного происхождения, сложенная в основном из крупных или мелких кристаллов сернокислого кальция $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Плотные образования гипса называют гипсовым камнем. По внешнему виду и строению горной породы различают кристаллический прозрачный гипс, гипсовый шпат, тонковолокнистый гипс с шелковистым отливом (селенит) и зернистый гипс. Наиболее частую разновидность зернистого

гипса, напоминающую по внешнему виду мрамор, иногда называют алебастром.

Гипсовые породы содержат обычно некоторое количество примесей глины, песка, известняка, битуминозных веществ и др. Чистый гипс имеет белый цвет, а примеси придают ему различные оттенки: оксиды железа окрашивают его в желтовато-бурые цвета, органические примеси — в серые и т.д. Небольшое количество примесей, равномерно распределенных в гипсе, не оказывает заметного влияния на качество вяжущих. Снижают качество крупные включения.

Согласно ГОСТ 4013—82 гипсовый камень, используемый для производства гипсовых вяжущих веществ, должен содержать не менее 95 % двухводного гипса в сырье первого сорта, не менее 90% в сырье второго сорта и не менее 80 и 70 % в сырье третьего и четвертого сортов. В гипсовых породах лучших месторождений обычно содержится до 2 — 5 % примесей, но часто их количество достигает 10 — 15 % и более.

Средняя плотность гипсового камня зависит от количества и вида примесей и составляет 2,2 — 2,4 г/см³.

Природный ангидрит — горная порода осадочного происхождения, состоящая преимущественно из минерала — безводного сернокислого кальция CaSO_4 . Залежи ангидрита обычно подстилают слой двухводного гипса. Под действием грунтовых вод ангидрит медленно гидратируется и переходит в двухводный гипс. Поэтому в природе ангидрит редко состоит из одного безводного сернокислого кальция и обычно содержит до 5 — 10 % и более двухводного гипса.

Ангидрит по сравнению с двухводным гипсом — порода более плотным и прочная. Его истинная плотность достигает 2,9 — 3,1 г/см³. Чистый ангидрит белого цвета, но в зависимости от примесей он, как и гипс, имеет различные оттенки. В природе ангидрит встречается реже, чем двухводный гипс. Месторождения ангидрита имеются в Башкирии, Средней Азии и Украине.

В качестве исходных материалов для производства гипсовых и ангидритовых вяжущих веществ рационально использовать побочные продукты (отходы) химической промышленности — фосфогипс, борогипс, фторогипс и др.

При затворении строительного гипса достаточным количеством воды (60 — 70 %) образуется пластичное тесто, которое затем начинает быстро загустевать. Время от начала затворения гипсового теста до полной потери им пластичности называется периодом схватывания. За периодом схватывания следует период твердения, характеризующийся переходом теста в камневидное состояние с постепенным нарастанием прочности.

Полуводный гипс $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ растворяется в воде с образованием насыщенного раствора. Поскольку растворимость двухводного гипса примерно в 4 раза меньше полуводного, из раствора выпадают кристаллы двухводного гипса [189]:



Рост кристаллов двухводного гипса приводит к образованию кристаллизационной структуры, т.е. кристаллического сростка, в результате срастания отдельных кристаллов. Прочность кристаллизационной структуры определяется ее плотностью, т.е. степенью заполнения объема твердеющего гипсового камня кристаллами двухводного гипса и прочностью контактов срастания кристаллов. В процессе твердения происходит некоторое увеличение объема, вызываемое кристаллизационным давлением растущих кристаллов двухводного гипса.

При высыхании затвердевшего гипсового камня прочность его попытается, так как испарение пленочной воды сопровождается упрочнением контактов срастания кристаллов двухводного гипса. Однако при искусственной сушке температура не должна превышать 120 °С во избежание значительной дегидратации затвердевшего гипса, что достигается строгим контролем температуры и времени сушки.

В зависимости от качества строительный гипс разделяют на сорта (табл. 10).

Таблица 10

Сортамент строительного гипса

Показатель	Норма для сорта		
	первого	второго	третьего
Тонкость помола — остаток на сите с сеткой № 02, %, не более	15	20	30
Предел прочности, МПа, при изгибе образцов балочек размером 4x4x16 см в возрасте 1,5 ч, не менее	2,7	2,2	1,7
Предел прочности, МПа, при сжатии половинок образцов — балочек в возрасте 1,5 ч, не менее	5,5	4,5	3,5

Начало схватывания гипса любого сорта должно наступать не ранее 4 мин, а конец схватывания — не ранее 6 мин, но не позже 30 мин с момента затворения гипса водой.

Таким образом, строительный гипс является быстросхватывающимся вяжущим веществом. На сроки схватывания гипса оказывают влияние тонкость помола, степень обжига, предварительное вылеживание и другие факторы. Сроки схватывания гипса можно регулировать, применяя замедлители (буру, костный клей, сульфитно-спиртовую барду и др.) или ускорители (природный гипс и др.) схватывания.

Как уже отмечалось, для получения пластичного теста строительный гипс требует значительного количества воды (60 — 70 % от массы гипса), для гидратации полугидрата теоретически требуется только 18,6 % воды. Избыточная вода, испаряясь, обуславливает высокую пористость гипсового камня, что определяет его малую теплопроводность, однако приводит к снижению механической прочности.

Жидкое стекло. Жидким стеклом называют растворимые в воде соли кремневой кислоты $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ и $\text{K}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$. В строительстве используют главным образом более дешевый силикат натрия — натриевое стекло [57]. Величина n , называемая силикатным модулем, колеблется в пределах 2,5 — 3,5.

Жидкое стекло получают сплавлением кварцевого песка с содой или сульфатом натрия при температуре 1300 — 1400 °С. После охлаждения расплава образующиеся куски обрабатывают в автоклаве паром под давлением 6 — 8 ат. В результате получается вязкая жидкость, которую используют в строительстве.

Твердение жидкого стекла происходит только в воздушной среде. Под действием углекислого газа силикат натрия разлагается [39]:



Выделяющийся при этом в виде коллоидного раствора аморфный кремнезем обладает клеящей способностью. Сущность процесса его твердения в таких условиях заключается в испарении жидкой фазы, повышении концентрации свободного коллоидного кремнезема, в его последующей коагуляции и уплотнении.

Процесс твердения жидкого стекла может быть существенно ускорен добавкой кремнефтористого натрия, взаимодействующего с силикатом натрия:



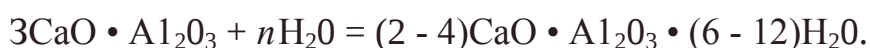
В результате значительно ускоряется выпадение геля кремневой кислоты $\text{Si}(\text{OH})_4$ или, что, то же самое, $\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Это приводит к быстрому отверждению жидкого стекла.

Характерными особенностями поведения затвердевшего жидкого стекла при нагревании являются его плавление и вспучивание, приводящие к образованию довольно устойчивого вспененного слоя, обладающего малой теплопроводностью. На этом свойстве растворимого стекла основано, в частности, применение силикатных огнезащитных красок. Вспучивание пленки из растворимого стекла происходит в результате дегидратации геля кремне-пой кислоты. Огнезащитный эффект от применения составов на основе жидкого стекла определяется качеством покрасочного слоя: плотностью, однородностью, толщиной пленки, сцеплением с основанием и др.

Портландцемент. Портландцементом называют гидравлическое нижеющее вещество, получаемое путем совместного тонкого измельчения клинкера и необходимого количества двуводного гипса. Последний применяется в целях регулирования сроков схватывания цемента. Количество двуводного гипса определяется из условия, чтобы SO_3 в готовом цементе было не менее 1,5 и не более 3,5 %. Клинкер получают обжигом до спекания сырьевой смеси надлежащего состава, обеспечивающего преобладание в нем силикатов кальция.

Основными минералами, входящими в состав портландцемента, являются силикаты кальция ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ и $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), четырехкальциевый алюмоферрит ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) и трехкальциевый алюминат ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$). В среднем портландцемент содержит 40 — 60 % трехкальциевого силиката, 20 — 40 % двухкальциевого силиката, 10 — 18 % четырехкальциевого алюмоферрита и 5 — 15 % трехкальциевого алюмината.

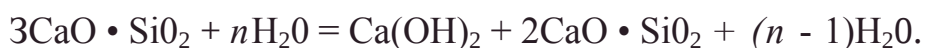
При затворении портландцемента водой вначале наиболее интенсивно протекает реакция гидратации трехкальциевого алюмината:



Большая скорость этой реакции обуславливает образование кристаллического сростка в первые минуты затворения цемента водой и резкое снижение подвижности цементного теста.

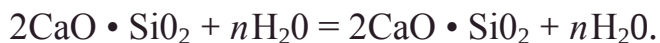
Вторым по скорости гидратации минералом портландцемента является четырехкальциевый алюмоферрит, при гидратации которого образуется трехкальциевый гидросиликат и однокальциевый алюмоферрит. Этот минерал обладает более высокой конечной механической прочностью.

Трехкальциевый силикат по скорости гидратации занимает третье место. Гидратация этого минерала сопровождается выделением гидрата окиси кальция:



Продукт гидратации трехкальциевого силиката обладает высокой механической прочностью и в значительной мере определяет основные

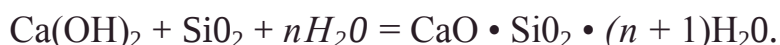
физико-механические свойства твердеющего цементного камня в первые сутки твердения. В более поздние сроки твердения рост прочности портландцементного камня определяется двухкальциевым силикатом, характеризующимся замедленным твердением и гидратирующимся по схеме:



Портландцемент — наиболее широко применяемое в строительстве гидравлическое вяжущее вещество. Он выпускается как без добавок, так и с активными минеральными добавками в количестве до 15 % массы цемента или с инертными добавками в количестве до 10 %. При большем количестве добавок цементы уже относятся к смешанным.

Гипс в портландцемент добавляют для регулирования скорости схватывания и некоторых других свойств. Клинкерный порошок без гипса при смешивании с водой быстро схватывается и затвердевает в цементный камень, который характеризуется пониженными механическими свойствами.

Активными минеральными добавками называются вещества, которые при смешивании (в тонкоизмельченном виде) с известью или совместном помоле с ней после затворения водой образуют тесто, способное после твердения на воздухе продолжать твердеть и под водой. Это объясняется тем, что $\text{Ca}(\text{OH})_2$ вступает с им и иным кремнеземом добавки в химическое взаимодействие, образуя малорастворимый в воде гидросиликат кальция:



Активные минеральные добавки бывают природные и искусственные. К числу природных добавок **относятся** диатомит, вулканические пеплы, пески, пемзы и др. Искусственными добавками являются молотые доменные гранулированные шлаки, золы, обожженные глинистые материалы (глиниты и цемянки) и др.

И портландцемент с минеральными добавками разрешается вводить гранулированные доменные и электротермофосфорные шлаки в количестве до 20 % массы вяжущего, активные добавки осадочного происхождения (кроме глиежей) не более 10 %. Другие активные добавки (вулканического

происхождения, глиежи) допускается вводить в количестве до 15 % массы получаемого цемента. Шлакопортландцемент должен содержать доменные или электротермофосфорные шлаки не менее 21 и не более 80 % массы вяжущего вещества. При производстве цемента для интенсификации процесса помола допускается введение специальных добавок в количестве до 1 % массы вяжущего.

Глиноземистый цемент. Глиноземистый цемент, получаемый путем помола плавящихся бокситов, содержит низкоосновные алюминаты кальция. Технические свойства глиноземистого цемента во многом определяются содержанием в нем однокальцевого алюмината.

Глиноземистый цемент более предпочтителен при изготовлении огнезащитных составов, наносимых методом торкретирования (набрызга), что обусловлено его большой скоростью твердения и высокой механической прочностью в раннем возрасте. Это позволяет получить достаточную прочность нанесенного слоя уже через двое-трое суток после нанесения. Начало схватывания теста должно наступать не ранее 30 мин, а конец — не позднее 10 ч. Обычно начало и конец схватывания наступают соответственно через 1 — 1,5 и 4 — 6 ч. При необходимости замедлить схватывание вводят небольшие добавки извести, портландцемента и др.

Основной реакцией, протекающей после затворения глиноземистого цемента водой, является реакция гидратации однокальцевого силиката:



Гидратированный двухкальцевый алюминат кристаллизуется, образуя сросток, а гидроокись алюминия выпадает в виде аморфного осадка и заполняет внутренние поры цементного камня. Количество воды, присоединяемой во время гидратации однокальцевого алюмината, и состав конечного продукта гидратации определяются температурными условиями твердения: в случае твердения глиноземистого цемента при температуре выше 30°C вместо $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot aq$ может образоваться трехкальцевый шестиводный алюминат ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), обладающий низкой меха-

нической прочностью. Поэтому при использовании глиноземистого цемента температура твердеющего слоя не должна превышать 30°C.

Бетоны на глиноземистом цементе хорошо сопротивляются действию температур до 1200 — 1400 °C и выше. В них не возникают разрушающие деформации (как у бетонов на портландцементе) при увлажнении после воздействия высоких температур. Это объясняется тем, что в глиноземистом цементе нет гидроксида кальция, который, присутствуя в затвердевшем портландцементе, при нагревании до 500 °C и выше переходит в CaO, гидратирующий при повторном увлажнении, увеличиваясь в объеме и разрушая цементный камень.

Жаростойкость глиноземистого цемента зависит и от его минерального состава: она тем выше, чем больше в нем глинозема и чем меньше кремнезема, магнезии и других примесей. Высокоогнеупорный глиноземистый цемент характеризуется примерно следующим составом: Al_2O_3 — 70...74%; CaO — 26...30%; SiO_2 и Fe_2O_3 — 0,5...1%. По данным работы [85] бетоны на глиноземистом цементе с шамотом в виде мелкого и крупного заполнителя можно применять при температурах 1200 — 1300 °C, а бетоны с высокоогнеупорными хромитами — при температурах 1400 — 1600 °C.

Глиноземистый цемент дороже и дефицитнее, чем портландцемент. Проведенные во ВНИПИ «Теплопроект» исследования показали возможность замены части глиноземистого цемента тонкомолотой огнеупорной глиной. Количество вводимой молотой глины может составлять до 50 % массы вяжущего (цемент — глина).

Фосфатные вяжущие. Фосфатными вяжущими называют все содержащие фосфаты соединения, в результате применения которых композиции твердеют. Характерным примером фосфатных вяжущих являются гетерогенные системы на основе фосфорных кислот и соединений, образующих при взаимодействии с ними кислые соли. К вяжущим такого типа относятся также продукты взаимодействия фосфорнокислых растворов

с окисными или силикатными составами, в которых твердый компонент растворился не полностью. Кроме того, в качестве фосфатных вяжущих применяют стеклообразные и кристаллообразные соединения фосфора, вводимые в состав материалов в твердом состоянии (так называемое «сухое» связующее). Особую группу вяжущих составляют гомогенные растворы фосфатов различной концентрации (фосфатные связующие), а также фосфорных кислот.

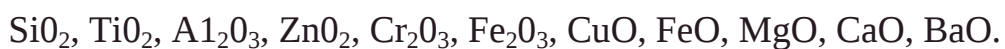
Наиболее широко принятой характеристикой состава фосфатных связующих является мольное или весовое отношение P_2O_5 / Me_nO_m , однако при этом необходимо указывать общую концентрацию растворённых веществ или содержание H_2O .

Под термином «отвердевание» в технологии фосфатных материалов обычно понимают процессы, приводящие к появлению у изделия определенных свойств: водостойкости, прочности, минимальной способности к выделению летучих продуктов и т.д.

Ортофосфорная кислота (H_3PO_4) и ее металлофосфатные соединения (фосфатные связующие) являются основными и необходимыми продуктами для производства фосфатных материалов, формирующихся на основе кислотно-основного взаимодействия. В этом классе связующих фосфорная кислота (затворитель) характеризуется наиболее интересными свойствами в силу особенности электронного строения фосфора, входящего в ее состав, и его способности образовывать неорганические полимерные структуры.

Процессы, обуславливающие твердение фосфатных масс, сложны, индивидуальны для каждого состава и еще мало изучены. На ход процесса решающее влияние оказывают основность веществ, входящих в цементный порошок, кислотность, жидкость затворения, температура и т.п. Способность фосфатных вяжущих образовывать устойчивую композиционную связь между отдельными составляющими материала регулируется применением окисных соединений ряда основности, изменением концентрации ортофосфорной кислоты нагревом до температур, обеспечивающих фор-

мирование керамикоподобных фаз, не подверженных гидратации. Активность фосфорной кислоты по отношению к некоторым окислам выражается следующим рядом (по возрастанию активности):



При создании строительных материалов в фосфатных композициях редко используют чистые окислы. Как правило, применяют минеральное сырье (шлаки, золы, глины) сложного химического состава. Вяжущие свойства в системе «окисел — фосфорная кислота» регулируют изменением в составе цемента содержания того или иного продукта, имея в виду, что основные окислы могут вступать в бурное взаимодействие с кислотой и мешать нормальному протеканию процессов структурообразования, а наличие в составе материала менее активных компонентов требует нагревания.

В производстве часто вместо ортофосфорной кислоты используют ее растворы (фосфатные связующие), получаемые нейтрализацией H_3PO_4 солями аммония, магния, кальция, цинка и других металлов. Формирование фосфатных вяжущих, в которых в качестве затворителя применяют фосфатные связующие, обусловлено не только процессами взаимодействия компонентов смеси, но и кристаллизацией цементирующих продуктов из раствора. Скорость протекания этих двух процессов зависит от состава цемента, наполнителя, фосфатного раствора.

Можно подобрать составы в системе «наполнитель — фосфатное связующее», в которых цементный камень будет формироваться только за счет процесса поликонденсации, вызванного нагревом и пересыщением раствора вследствие удаления влаги. Это обеспечивает фосфатным связующим определенные преимущества перед фосфорной кислотой, поскольку они уже в исходном состоянии обладают клеящими свойствами и способностью к пленкообразованию.

Родоначальниками значительного числа фосфатных связующих явились алюмофосфатные связующие, представляющие собой метастабильные

растворы фосфатов алюминия. Их синтез сводится к растворению в ортофосфорной кислоте 65%-ной концентрации требуемого количества гидроокиси алюминия. Готовое связующее представляет собой сиропобразный прозрачный раствор.

Имеются положительные результаты по использованию различных отходов в технологии производства материалов на фосфатных связующих, особенно производства стеновых, теплоизоляционных и огнеупорных изделий. Причем в большинстве случаев рассматривается возможность применения минеральных отходов в композиции с ортофосфорной кислотой или фосфатными связующими, синтезированными из термической H_3PO_4 на более доступную шламовую фосфорную кислоту, получаемую при сжигании фосфорных шламов — отходов электротермического производства желтого фосфора.

Шламовая кислота отличается от термической содержанием недоокисленных форм фосфора, а также соединений кальция, железа, алюминия, кремния, органических веществ и твердых минеральных примесей.

Присутствие указанных соединений и примесей практически исключает применение шламовой кислоты в производстве удобрений, кормовых фосфатов и моющих средств. Последнее обстоятельство и явилось обоснованием к постановке исследований по изучению шламовой фосфорной кислоты как сырья для производства фосфатных связующих. При этом принималась во внимание перспектива расширения переработки фосфатных шламов на кислоту, причем не только первичных, с высоким содержанием фосфора (50 — 70 %), но и бедных фосфорсодержащих шламов, таких как котельное молоко, кубовый остаток и известковый шлам.

В исследованиях использовалась шламовая кислота из установок по сжиганию фосфорного шлама Джамбульского ПО "Химпром" им. Ленинского комсомола Казахстана. Эта кислота непрозрачна, имеет темно-серый цвет за счет содержания в ней примесей органических соединений,

окислов железа и взвешенных тонкодисперсных частиц фосфорсодержащих минералов. Плотность кислоты — $1,583 \text{ г/см}^3$, концентрация по H_3PO_4 — 73,8%. Содержание взвешенных частиц может колебаться в широких пределах (от 0,1 до 7% по массе).

С учетом того что из всех фосфатных связующих наиболее широкое применение находит алюмохромфосфатное связующее (АХФС), его промышленное производство было освоено с использованием шламовой кислоты. Синтез АХФС осуществлялся известным способом — путем растворения при нагревании сначала технического хромового ангидрида, а затем гидрата окиси алюминия марки ГД-0 в 65%-ной ортофосфорной кислоте (плотность $1,475 \text{ г/см}^3$) с последующим восстановлением шестивалентного хрома до трехвалентного формалином.

Исходные материалы были взяты в количествах, обеспечивающих получение раствора алюмохромфосфатного связующего с мольным отношением $\text{P}_2\text{O}_5 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3) = 2,3$. При этом использовали исходную шламовую кислоту с примесями взвешенных частиц и отфильтрованную. Для сравнительных испытаний была изготовлена порция АХФС на основе стандартной термической фосфорной кислоты (ГОСТ 10678—43). Характеристика полученных АХФС приведена в табл. 11.

Таблица 11

**Характеристика АХФС из стандартной термической
и шламовой ортофосфорной кислоты**

Показатель	Вид ортофосфорной кислоты		
	Стандартная термическая	Шламовая исходная	Шламовая отфильтрованная
Плотность раствора, г/см^3	1,612	1,626	1,623
Химический состав, % по массе:			
P_2O_5	35 — 39	38	38,5
Al_2O_3	6,5 — 9,0	8,1	8,3
Cr_2O_3	3,5 — 4,5	4,2	4,2
Потеря при прокаливании, %	47 — 55	51	52
Мольное отношение $\text{P}_2\text{O}_5 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3)$	2,3 — 3,0	2,5	2,48

Как видно из приведенных данных, связующие из шламовой кислоты по всем показателям практически не отличаются от АХФС, полученного на основе стандартной термической H_3PO_4 . Изготовленное на шламовой кислоте АХФС по своим адгезионным свойствам и стабильности этих свойств во времени практически равноценно АХФС, полученному на основе стандартной термической кислоты.

Смешанные вяжущие вещества со специальными свойствами. В

последнее время все большее применение находят вяжущие, получаемые смешением различных «чистых» вяжущих друг с другом и с некоторыми добавками. Это позволяет получать композиции, характеризующиеся специальными свойствами или свойствами, присущими каждому компоненту.

Смешивая портландцемент или глиноземистый цемент с высокопрочным или строительным гипсом и высокоосновным гидроалюминатом в точно установленных соотношениях (по массе), получают водонепроницаемый расширяющийся цемент (ВРЦ). Разработан также расширяющийся портландцемент (РПЦ), получаемый измельчением смеси портландцементного клинкера, высокоглиноземистого шлака, двуводного гипса и гидравлической добавки. А.В. Волженский предложил гипсоцементно-пуццолановые (ГЦПВ) и гипсошлакоцементно-пуццолановые вяжущие (ГШЦПВ), представляющие собой смеси строительного или высокопрочного гипса с портландцементом и пуццолановой добавкой. Для этих вяжущих показательны быстрый рост прочности, обусловленный наличием полуводного гипса, и способность твердеть во влажных условиях подобно гидравлическим цементам.

Рассмотрим составы, способы изготовления и свойства гипсоцементно-пуццолановых вяжущих, применяемых в огнезащитных покрытиях.

Гипсоцементно-пуццолановые вяжущие вещества получают смешиванием полуводного гипса (строительного или высокопрочного),

портландцемента и той или иной кислой активной минеральной (пуццолановой) добавки.

Как известно, смеси гипсовых вяжущих веществ с портландцементом в период твердения характеризуются неустойчивостью. При затворении водой смеси вначале интенсивно твердеют, но через 1 — 3 мес, а иногда и позднее происходит падение прочности вяжущего и даже разрушение. Такое поведение смесей гипсовых вяжущих с портландцементом при твердении — следствие образования трехсульфатной формы гидросульфоалюмината кальция из высокоосновных алюминатов кальция, содержащихся в портландцементе, и сульфата кальция.

Представлялась заманчивой возможность сочетания гипсовых материалов с портландцементом в любых соотношениях и получения вяжущих, твердеющих без разрушительных деформаций и характеризующихся водостойкостью, высокой сульфатостойкостью и быстротой роста прочности, т.е. положительными свойствами, присущими отдельным компонентам.

Было установлено, что если в смеси гипсовых вяжущих веществ с портландцементом вводить надлежащее количество пуццолановых (гидравлических) добавок, содержащих кремнезем в активной форме, то достигаются полная их стабильность и рост прочности при длительном твердении в воздушной или водной | среде без разрушительных деформаций. При твердении вяжущих из смеси гипса, портландцемента и пуццолановой добавки роль последней сводится в первую очередь к снижению концентрации гидроксида кальция в водной среде до уровня, при котором нарушаются условия стабильного существования высокоосновных гидроалюминатов кальция ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ и $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) и создаются предпосылки к переходу их в более устойчивые низкоосновные.

В качестве пуццолановых добавок используют обычно такие материалы, как трепел, опоки, диатомит, активные вулканические породы, глины, обожженные при 600 — 700 °С, некоторые активные золы и т.п.

В настоящее время применяют гипсоцементно-пуццолановые вяжущие примерно следующего состава [14], % по массе:

полуводный гипс — 75...50;

портландцемент — 15...25;

пуццолановая добавка (трепел, опока, диатомит) активностью не менее 200 мг/г — 10...25.

Вместо портландцемента целесообразно применять пуццолановый портландцемент с надлежащим количеством активной гидравлической добавки и, наконец, шлакопортландцемент. Если имеются гранулированные доменные шлаки, целесообразно изготавливать гипсошлакоцементные вяжущие (ГШЦВ), содержащие 65 — 40% полуводного гипса или ангидрита, 30 — 50 % кислого доменного шлака и 5 — 8% портландцемента. Основная роль портландцемента сводится в данном случае к щелочной активизации вяжущих свойств шлаков. При повышенной основности доменных шлаков возникает необходимость ввода в ГШЦВ также пуццолановых добавок (10 — 15%) для снижения концентрации гидроксида кальция до безопасных значений.

ОБЕТОНИРОВАНИЕ И ОШТУКАТУРИВАНИЕ

Обетонирование относится к конструктивным способам огнезащиты и применяется для защиты бетонных, железобетонных и металлических конструкций. Сущность этого способа заключается в увеличении площади сечения бетонных элементов, а также в увеличении до требуемой толщины защитного слоя конструкций. Обетонирование применяют для огнезащиты сооружений, расположенных на открытом воздухе, а при реконструкции зданий и сооружений — для усиления конструкций при одновременном переводе зданий (сооружений) в категорию с более высокой степенью огнестойкости. Бетон — один из долговечных материалов, поэтому эффективно его применение в огнезащите конструкций, подвергающихся динамическим воздействиям.

Для огнезащиты бетонных и железобетонных конструкций целесообразно использовать те же марки бетона, что и в основной конструкции. Для огнезащиты металлических конструкций используют как тяжелые бетоны (плотностью 2200 — 2500 кг/м³), так и бетоны средней и пониженной плотности. К бетонам пониженной плотности относятся керамзитобетон, гипсобетон, бетоны с легкими пористыми заполнителями (керамзитом, перлитом, вермикулитом, шлаковой пемзой, гранулированным шлаком).

Характеристика жаростойких бетонов средней плотности (90С — 1100 кг/м³) дана в СНиП 2.03.04-84 . Составы типичных бетонов огнезащитного назначения приведены в табл. 12.

Таблица 12

Составы бетонов огнезащитного назначения

Вид бетона	Компоненты	Единица измерения	Расход на 1 м ³ бетона
Керамзитобетон	Цемент М400	кг	200
	Керамзит фракций 0—5 мм	»	560
	Керамзит фракций 5—10 »	»	287
	Керамзит фракций 10—15 »	»	369
	Вода	л	110
Бетон на трепельном заполнителе	Цемент М400	кг	342
	Трепельный гравий фракций 5—20 мм	»	788
	Песок кварцевый	»	531
	Вода	л	249
Поризованный бетон плотностью 1433 кг/м ³	Цемент М400	кг	400
	Песок	»	1248
	Поризующая добавка ОП-7 (0,35% от массы цемента)	»	1,4
	Вода (11% от массы цемента и песка)	л	181
Поризованный бетон плотностью 1691 кг/м ³	Цемент М400	кг	400
	Песок	»	1248
	Поризующая добавка ОП-7 (0,1% от массы цемента)	»	0,4
	Вода (11% от массы цемента и песка)	л	181
Жаростойкий торкрет-бетон плотностью 780 кг/м ³	Глиноземистый цемент	кг	328
	Вспученный вермикулит	»	282
	Керамзитовый песок	»	188
	Вода	л	131

Для огнезащиты конструкций используют также обмазки из жаростойкого бетона. Эффективными пористыми заполнителям в этом случае являются керамзит, вспученный вермикулит и перлит (см. п. 2.1). Кроме того, применяют смешанный заполнитель, например, керамзит фракций 5 — 10 мм в качестве крупного, а вермикулит фракции 0,6 — 5 мм в качестве мелкого заполнителя. Применение смешанных заполнителей позволяет снизить плотность бетона до 600 кг/м^3 при удовлетворительной прочности.

С целью придания жаростойкости цементному камню в состав портландцемента вводят тонкомолотые добавки, содержащие SiO_2 и Al_2O_3 , в количестве до 30 % от массы цемента. Эффективными тонкомолотыми добавками являются зола-унос ТЭЦ, бой диатомового кирпича, шамот, цемянка.

Рассмотрены методы получения легких жаростойких бетонов на пористых заполнителях, в частности, теплоизоляционных жаростойких торкрет-масс на основе вермикулита, относящихся к числу наиболее термостойких и легких огнезащитных составов. Эти составы наносятся на конструкции прогрессивными способами полусухого или мокрого торкретирования. В зависимости от соотношения компонентов и режима торкретирования торкрет-бетоны имеют среднюю плотность от 300 до 900 кг/м^3 , теплопроводность от 0,07 до 0,17 Вт/(м·К), предел прочности на сжатие от 0,3 до 2,5 МПа, а на изгиб от 0,2 до 1,5 МПа.

В качестве примера можно привести следующий состав сухой торкрет-массы, используемой для получения огнезащитного слоя со средней плотностью около 560 кг/м^3 [85], % по массе: вяжущее (глиноземистый цемент) — 38; неупрочненный вспученный вермикулит — 36; керамзитовый песок — 26.

Торкрет-бетон, полученный по этой рецептуре, имеет предел прочности на сжатие 0,72 МПа, на изгиб — 0,63 МПа при жаростойкости не ниже 1100 °С.

Конструирование и выполнение огнезащиты строительных конструкций способом обетонирования должны соответствовать требованиям СНиП 2.03.01-84 и СНиП 2.03.04-84. Обетонирование может выполняться как путем нанесения на поверхность стальных конструкций слоя бетона, так и заключения стальных стержней из прокатных профилей в монолитную бетонную или железобетонную оболочку. Армирование огнезащитного слоя бетона может быть самым разнообразным в зависимости от толщины слоя и требуемой степени усиления конструкции. На рис. 1 в качестве примера показаны приемы обетонирования стальных колонн двутаврового сечения. По первому варианту предполагается использование стального каркаса 2, по второму — проволочки 4.

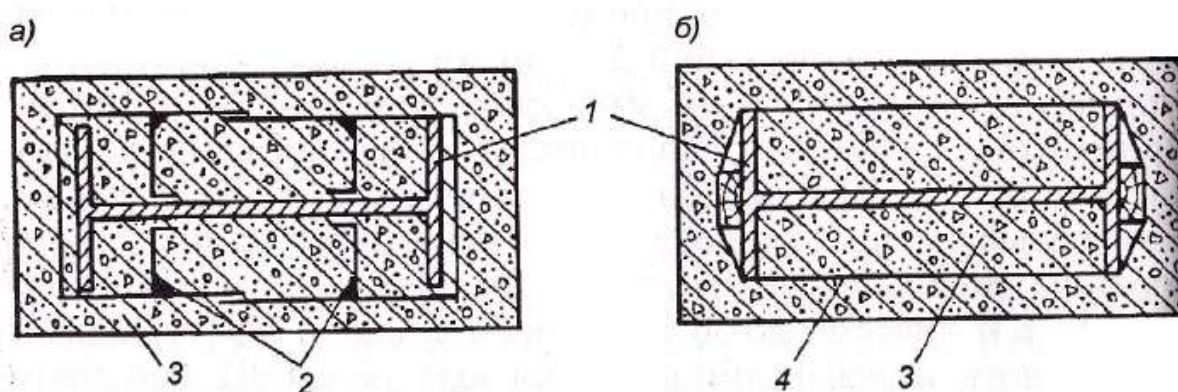


Рис. 1. Поперечные сечения стальных колонн с конструктивной огнезащитой: а — огнезащита со стальным каркасом; б — то же со стальной проволокой; 2 — арматура; 3 — бетон; 4 - проволока

Рассмотрим типичные результаты огневых испытаний бетонов, применяемых в качестве средства огнезащиты строительных конструкций. Испытаниям подвергались плиты из керамзитобетона толщиной 74 мм, из поризованного песчаного бетона толщиной 102 мм и плиты из бетона на трепельном заполнителе толщиной 121,5 мм. Состав бетонов характеризуется данными табл. 12. Внутри плит на различном расстоянии от обогреваемой поверхности были установлены датчики температуры. При огневых испытаниях на обогреваемую поверхность воздействовала газовая среда температурой, изменяющейся во времени по стандартному режиму:

$$T_f = 345 \lg (8t + 1) + T_0,$$

где T_f — температура газовой среды, °C; T_0 — начальная температура, °C; t — время огневого воздействия, мин.

Полученные при огневых экспериментах кривые прогрева плит во времени представлены на рис. 2 — 4.

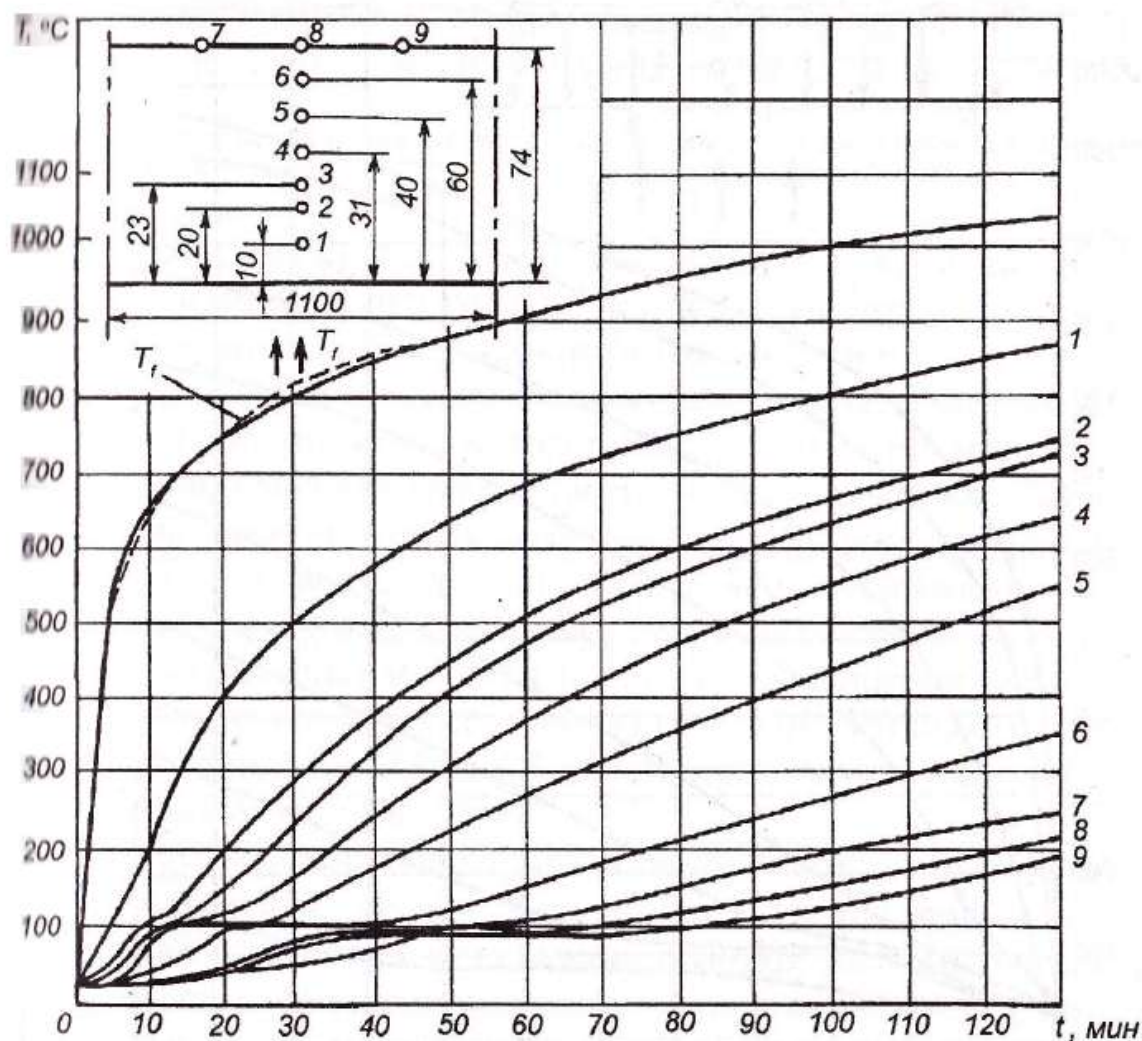


Рис. 2.2. Кривые прогрева плиты толщиной 74 мм из керамзитобетона ($\rho_0 = 1500 \text{ кг/м}^3$, $w = 3,2\%$). Здесь и далее: ρ_0 — объемная плотность; w — содержание влаги по массе (Цифры у кривых обозначают номера точек, в которых замерена температура.)

На этих кривых наблюдаются следующие особенности, характерные для всех испытанных огнезащитных бетонов. Во-первых, датчики температуры, расположенные глубже 20 мм от обогреваемой поверхности, фиксируют относительно быстрый подъем температуры начиная уже с первых минут огневого воздействия. Во-вторых, на температурных кривых, фиксируемых с

помощью этих датчиков, наблюдаются характерные «полки» в окрестности 100°C — участки постоянной или очень медленно повышающейся температуры. Следовательно, в глубине плит в течение достаточно продолжительного времени температура остается постоянной при интенсивном росте температуры поверхности. Причем длина отмеченных «полок» на температурных кривых (продолжительность во времени периодов стабилизации температуры) достигает для плит: из керамзитобетона толщиной 74 мм — 45 мин; из бетона на трепельном заполнителе толщиной 121,5 мм — 80 мин; из поризованного бетона толщиной 102 мм — 105 мм.

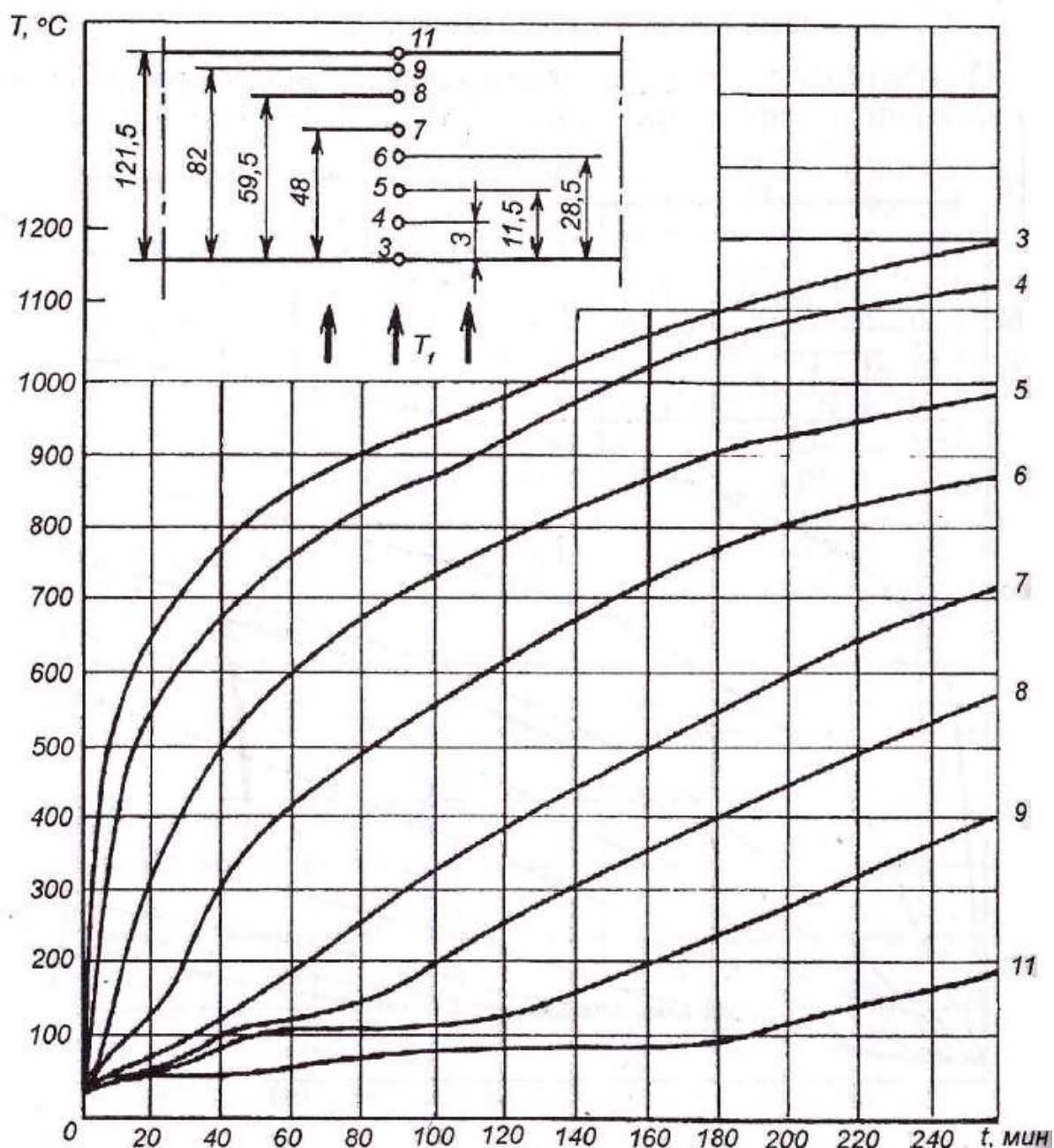
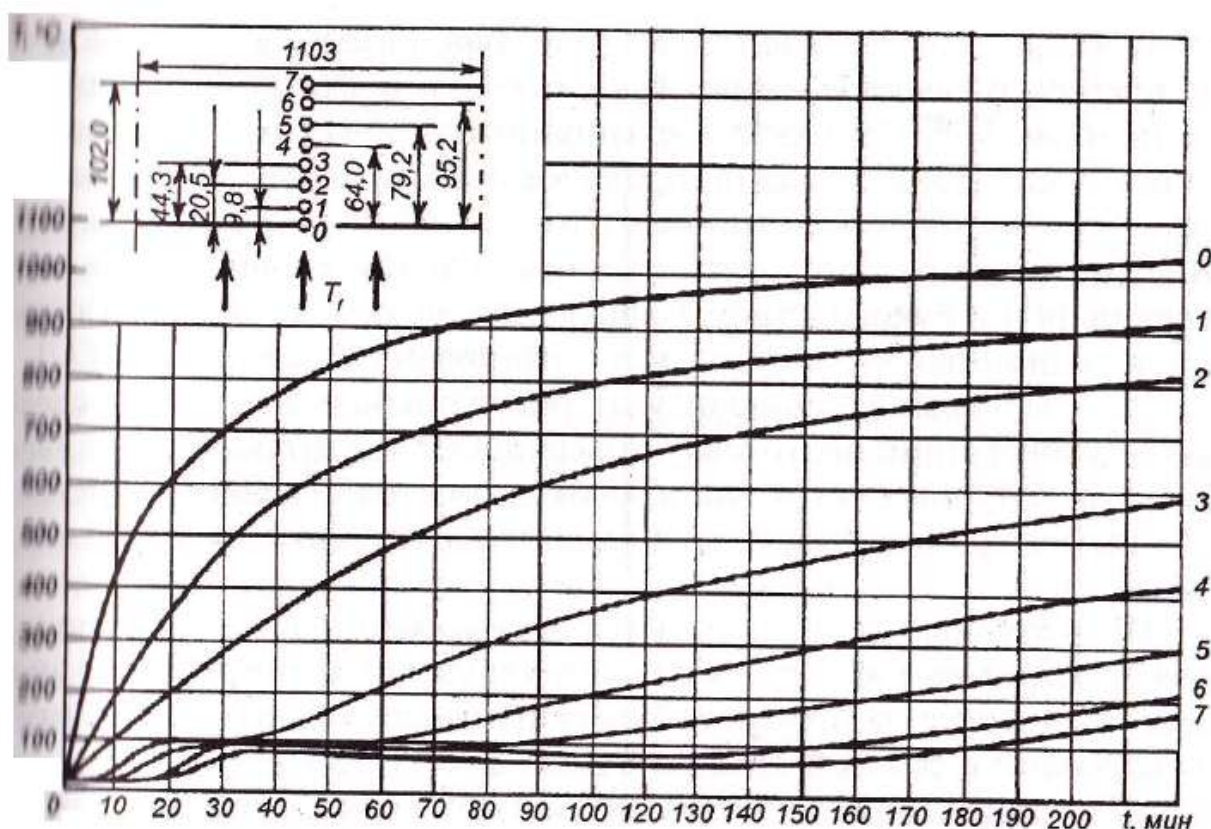


Рис. 2.3. Кривые прогрева плиты толщиной 121,5 мм из бетона на трепельном заполнителе ($\rho_0 = 1400 \text{ кг/м}^3$, $w = 13\%$)

Очевидно, что наличие отмеченных «полок» на кривых прогрева плит из огнезащитных бетонов свидетельствует о протекании сложных теплообменных процессов при огневом воздействии, приводящих к повышению их огнезащитной эффективности.

Ориентировочные значения толщины огнезащитного слоя бетона, необходимого для обеспечения предела огнестойкости стальных конструкций от 0,75 до 2,5 ч, согласно рекомендациям составляют от 20 до 60 мм.

Наряду с бетонами к числу традиционных средств огнезащиты относятся цементно-песчаные штукатурки. Их применяют в основном для облицовки металлоконструкций (колонн, ригелей, балок, связей и узлов сопряжений), расположенных как в помещениях, так и на открытом воздухе. Такое средство огнезащиты является достаточно стойким по отношению к агрессивной среде, к динамическим и механическим воздействиям.



В состав цементно-песчаной штукатурки входят вяжущее и заполнитель. В качестве вяжущего применяют портландцемент марки не ниже М400, а в качестве заполнителя — песок в соотношении 1:4,5. Приготовление и нанесение штукатурного раствора осуществляются механизированным способом в соответствии с Инструкцией по приготовлению и применению строительных растворов и Руководством по выполнению огнезащитных и теплоизоляционных штукатурок механизированным способом.

Работы по выполнению штукатурного покрытия включают следующие операции: подготовку поверхности под штукатурку, установку арматурных сеток (при необходимости) и маяков; нанесение штукатурного слоя; разравнивание нанесенного слоя по маякам.

Штукатурный слой не является одновременно антикоррозионной защитой при эксплуатации металлических конструкций в агрессивной среде, поэтому необходимо предусматривать их защиту от коррозии в соответствии со СНиП 2.03.11-85.

Штукатурный раствор наносят методом полусухого торкретирования или набрызга. Полусухое торкретирование обеспечивает нанесение штукатурного слоя практически любой толщины; при набрызге толщина одного слоя — не более 15 мм. В случаях когда требуется нанести методом набрызга покрытие толщиной свыше 15 мм, применяют оштукатуривание защищаемой поверхности слоями толщиной по 10 — 15 мм.

Поверхности металлических конструкций перед нанесением огнезащитных покрытий должны быть очищены от грязи, ржавчины, пыли, жировых пятен, масел и краски. Для очистки поверхностей от ржавчины и загрязнений используют, как правило, скребки и металлические щетки с последующей подчисткой волосистой щеткой или сжатым воздухом. Если не удастся полностью очистить поверхность металла данным способом, допускается применение пескоструйной обработки. В качестве абразивного материала рекомендуется песок максимальной крупностью частиц 1 мм. Поверхности конструкций, подлежащие оштукатуриванию методом набрызга, для увеличения сцепления штукатурного слоя с основанием необходимо предварительно смачивать водой.

Толщина защитного штукатурного слоя в зависимости от требуемых пределов огнестойкости конструкций принимается согласно данным табл. 13. Защитный штукатурный слой для замкнутых сечений, а также любых сечений максимальным размером не более 200 мм армируется стальной плетеной одинарной сеткой, которую можно устанавливать непосредственно на защищаемую поверхность. Стальные колонны и ригели сечением 100х100 мм и менее, связи из уголкового стали сечением менее 150х150 мм и стальные конструкции, не подверженные при эксплуатации воздействию динамических нагрузок, защищают неармированной штукатуркой.

Для армирования штукатурного слоя сплошных и сквозных колонн, выполненных из швеллеров и уголков, максимальным размером сечения не более 500 мм используют одинарную сетку марки Р № 10-1,2, устанавливаемую по несущему арматурному каркасу. При расстояниях между элементами сечений более 500 мм дополнительно устанавливают с шагом 600 мм гнутые уголки, воспринимающие давление 0,01 МПа от наносимого раствора. Арматурные сетки в местах примыкания к стенам закрепляют с помощью дюбелей.

Таблица 13

**Толщина защитного слоя штукатурки
основных элементов металлических
конструкций**

Элемент конструкции	Толщина защитного слоя штукатурки, мм, в зави- симости от требуемых пределов огнестойкости	
	0,75 ч	2,5 ч
Колонна	25	60
Ригель	25	—
Связь	35	35

ОБЛИЦОВКА ИЗ КИРПИЧА

Кирпичная кладка рекомендуется для облицовки конструкций, находящихся как на открытом воздухе, так и в помещениях, при требуемых пределах огнестойкости 150 мин и более. Поскольку кирпичная кладка является стойкой к агрессивной среде и механическим воздействиям, она может быть использована в производственных зданиях и сооружениях, а также при реконструкции зданий и усилении несущих конструкций. Кирпичную облицовку применяют для огнезащиты вертикально расположенных элементов металлических конструкций (колонн, стоек). Характерная особенность этого способа огнезащиты состоит в том, что

облицовка из кирпича не теряет огнезащитных свойств после пожара и может использоваться повторно с незначительной доработкой.

При проектировании и возведении огнезащитных облицовок из кирпича следует руководствоваться рекомендациями СНиП II-22-81. Облицовка из кирпича не является антикоррозионной защитой металлических конструкций. Поэтому при ее использовании выполняют защиту металлоконструкций от коррозии в соответствии со СНиП 2.03.11-85.

Для устройства огнезащитной облицовки применяют: кирпич и камни керамические, кирпич и камни керамические лицевые, кирпич и камни силикатные. Марка кирпича — не ниже 76. Для кирпичной кладки используют цементно-песчаный раствор марки не ниже М50, в котором вяжущим служит портландцемент шлакопортландцемент или быстротвердеющий портландцемент марок не ниже М400.

В целях сохранения огнезащитных свойств кирпичной кладки ее армируют профилями из стали класса А-I или А-II, а также проволокой обыкновенной арматурной холодноотянутой класса В-1. Армирование огнезащитной облицовки назначают с учетом усиления связи в углах кирпичной кладки. Диаметр стержней арматуры принимают не более 8 мм. Устройство арматурных поясов выполняют для облицовки в 1/4 кирпича на расстоянии не более 0,6 м (через 6 рядов кладки), а для облицовки в 1/2 кирпича — не более 1,5 м.

Устройство огнезащитной облицовки из пустотелых и щелевидных кирпичей допускается только в полкирпича (120 мм).

Облицовку сплошных и сквозных колонн кирпичной кладкой выполняют по периметру сечения и по контуру защищаемой поверхности. Кирпичную кладку огнезащитной облицовки выполняют с однорядной (цепной) перевязкой швов при расстоянии: между вертикальными швами не менее 1/4 кирпича (65 мм). Горизонтальные и вертикальные швы кирпичной кладки огнезащитной облицовки тщательно заполняют раствором с

последующей разделкой их снаружи под расшивку. Толщина горизонтальных и вертикальных швов не должна превышать 10 мм.

В случае примыкания колонн к стенам для надежного соединения кирпичной кладки огнезащитной облицовки, а также для обеспечения герметизации стыка между стеной и облицовкой в стенах устанавливают анкеры, к которым приваривают арматуру кирпичной кладки. Защиту узлов сложной конфигурации в местах сопряжения колонн с ригелями, связями и плитами перекрытий выполняют монолитным железобетоном с установкой необходимых закладных деталей и выпуском арматуры для соединения огнезащитных облицовок колонн, ригелей и связей между собой.

При возведении кирпичной кладки огнезащитной облицовки и при ее эксплуатации не допускается устройство отверстий, борозд, ниш и крепления оборудования, не предусмотренных проектом. Оголовки колонны перед устройством огнезащитной облицовки защищают плитой из минеральной ваты на высоту не менее 200 мм.

ЛИСТОВЫЕ, ПЛИТНЫЕ И РУЛОННЫЕ ОБЛИЦОВКИ ИЛИ ЭКРАНЫ

Установка листовых, плитных и рулонных облицовок или экранов относится к числу конструктивных способов огнезащиты и находит все более широкое применение на практике.

Одним из преимуществ этого способа является то, что плитные и рулонные материалы можно применять для облицовки конструкций вновь возводимых зданий после пуска основного производства, а при реконструкции зданий вести огнезащитные работы без остановки производственных процессов. Кроме того, возможен демонтаж огнезащиты этого типа при выполнении работ по усилению несущих конструкций и при нанесении антикоррозионных покрытий на металлические конструкции. Внутренние полости между облицовкой и защищаемой конструкцией можно использовать для монтажа различных коммуникаций. Применение данного

способа огнезащиты позволяет избежать мокрых процессов при ее монтаже, что дает возможность вести работы не только при положительных, но и отрицательных температурах воздуха.

Геометрические размеры и некоторые характеристики типичных листовых, плитных и рулонных облицовок приведены в табл. 14.

Таблица 14

**Характеристика плитных и рулонных материалов,
используемых в огнезащите конструкций**

Материал	Плотность, кг/м ³	Размеры, мм	Технические показатели
Листы гипсокартонные и гипсоволокнистые	800 — 1150	(2500...4800) × × (600...1200) × × (8...25)	Разрушающая нагрузка при изгибе 350—400 Н при толщине листов 12—16 мм, теплопроводность ¹ 0,16 Вт/(м·К)
Плиты цементно-стружечные	1100 — 1400	(3200...3600) × × (1200...1250) × × (8...40)	Прочность при изгибе 0,9—1,2 МПа, при растяжении (перпендикулярно поверхности плиты) 0,35—0,4 МПа, водопоглощение за 24 ч — до 16% по массе, удельная теплоемкость 1,45 кДж/(кг·К), теплопроводность 0,20 — 0,21 Вт/(м·К)
Плиты перлито-фосфогелевые	200 — 300	1000×500 × × (50...100)	Прочность при изгибе 0,2—0,4 МПа, теплопроводность 0,065—0,08 Вт/(м·К)
¹ При температуре 20 °С.			

Материал	Плотность, кг/м³	Размеры, мм	Технические показатели
Плиты цементно-вермикулитовые	300 — 500	(300...900) × (300...900) × (50...100)	Прочность при сжатии 0,5—1,3 МПа, при изгибе 0,3—0,35 МПа, теплопроводность 0,08—0,12 Вт/(м·К), огнеупорность — до 1200 °С
Плиты вермикулитовые на основе жидкого стекла (ПВТН)	600 — 650	(300...1200) × (300...600) × (10...60)	Прочность при сжатии 1,2 МПа, при изгибе 1,0 МПа, теплопроводность 0,12 Вт/(м·К)
Плиты перлитцементные	225 — 350	(500...1000) × 500 × (50...100)	Прочность при изгибе 0,25 МПа, теплопроводность 0,07—0,08 Вт/(м·К)
Плиты минераловатные на синтетическом связующем	50 — 175	(500...1000) × 1000 × (40...100)	Теплопроводность 0,047—0,052 Вт/(м·К)
Плиты негоряемые термостойкие из базальтового волокна (ПНТБ)	Не более 140	1200 × 1200, толщина от 20 до 50	Теплопроводность 0,042 Вт/(м·К)
Маты минераловатные прошивные	100 — 125	(1000...2500) × (500...100) × (40...120)	Теплопроводность 0,044 Вт/(м·К)
Маты негоряемые термостойкие из базальтового волокна (МНТБ)	Не более 50	1500×1500, толщина от 40 до 80 мм	Теплопроводность 0,038 Вт/(м·К)
Маты из стекловолокна	150 — 175	(500...3000) × (200...700) × (20...50)	Теплопроводность 0,05 Вт/(м·К)
Маты из каолинового волокна	150	2000×450 × (10...30)	Теплопроводность 0,06 Вт/(м·К)
Маты из кремнеземного волокна	220 — 260	1000×500 × (10...45)	Теплопроводность 0,06 Вт/(м·К)

Наиболее дешевыми и достаточно широко выпускаемыми промышленностью средствами огнезащиты данного типа являются гипсокартонные (ГКЛ) и гипсоволокнистые (ГВЛ) листы. Они состоят из слоя гипса плотностью $800\text{--}1150\text{ кг/м}^3$, покрытого с обеих сторон картоном толщиной $0,5\text{ — }0,7\text{ мм}$. Гипсоволокнистые листы армированы стекловолокном, и применять их целесообразно в тех случаях, когда предъявляются повышенные требования к внешнему виду несущих конструкций.

Огнезащита из облицовок ГКЛ может выполняться в один и более слоев в зависимости от требуемого предела огнестойкости стальных конструкций. Для наружных облицовок рекомендуется использовать гипсокартонные листы толщиной не менее 14 мм .

В состав перлитофосфогелиевых плит входят перлит, жидкое стекло, ортофосфорная кислота, гидрофобизирующие добавки.

К числу наиболее эффективных для применения в огнезащитных конструкциях средств огнезащиты следует отнести плиты на основном вспученного вермикулита — наиболее термостойкого из видов легких заполнителей (см. §. 2.1) — и одного из минеральных вяжущих. Причем, вермикулитовые плиты на цементе можно использовать для наружных огнезащитных облицовок. Характеристика типичных цементно-вермикулитовых изделий дана в табл. 15, а вермикулитовых плит на основе жидкого стекла ПВТН (ТУ 5767-001-00281967-96) - в табл. 16.

Таблица 15

Техническая характеристика цементно-вермикулитовых изделий

Показатель	Единица измерения	Марка изделия		
		300	400	500
Плотность	кг/м ³	295	350	450
Прочность при сжатии:				
после сушки	МПа	0,5	0,6	1,0
после нагрева до 1000 °С	МПа	0,2	0,25	0,35
Усадка после нагрева до 1000 °С	%	3,3	3,37	3,5
Температура, при которой происходит разрушение материала под нагрузкой 0,03 — 0,05 МПа	°С	1180	1180	1180
Теплопроводность при 20 °С	Вт/(м·К)	0,081	0,093	0,116

Рассмотрим примеры конструктивного исполнения огнезащиты из плитных материалов. Так, для огнезащиты двутавровых балок пролетом до 12 м и высотой от 500 до 1050 мм были применены гипсокартонные листы (ГКЛ). Схемы конструктивного исполнения огнезащиты стальных колонн и балок гипсокартонными листами показаны на рис. 5. Для крепления ГКЛ к защищаемой конструкции между полками двутавров в поперечном направлении привариваются стальные пластины 40х3 мм (рис. 2.5, в) на расстоянии 500 мм одна от другой, к которым контактной точечной сваркой с шагом 250 мм по высоте привариваются штыри из гвоздей 70х3 мм с выпуском 50 мм. С наружной стороны полков двутавров также привариваются электродуговой сваркой штыри по три в ряд с шагом между рядами 500 мм (ширина полков двутавров от 200 до 400 мм). ГКЛ крепятся к защищаемой конструкции в два или три слоя. Первый слой ГКЛ накалывается на штыри, которые после этого загибаются. Стыки между листами оклеиваются огнестойкой тканью 8. Второй и третий слои ГКЛ приклеиваются к предыдущему при помощи клея ПМП с последующей обклейкой углов огнестойкой тканью. Стыки ГКЛ разных слоев располагаются вразбежку во избежание образования сквозных щелей. По данным ВНИИПО, огнестойкость стальных конструкций при защите двумя слоями ГКЛ общей толщиной 24, 28 и 32 мм соответственно равна 100; 120 и 132 мин.

Таблица 16

**Техническая характеристика вермикулитовых
плит на основе жидкого стекла ПВТН
плотностью 600 кг/м³**

Показатель	Единица измерения	Среднее значение показателя
Теплопроводность при 20 °С	Вт/(м·К)	0,12
Прочность: при сжатии при изгибе	МПа МПа	1,2 1,0
Сорбционное увлажнение	% (по массе)	4,5

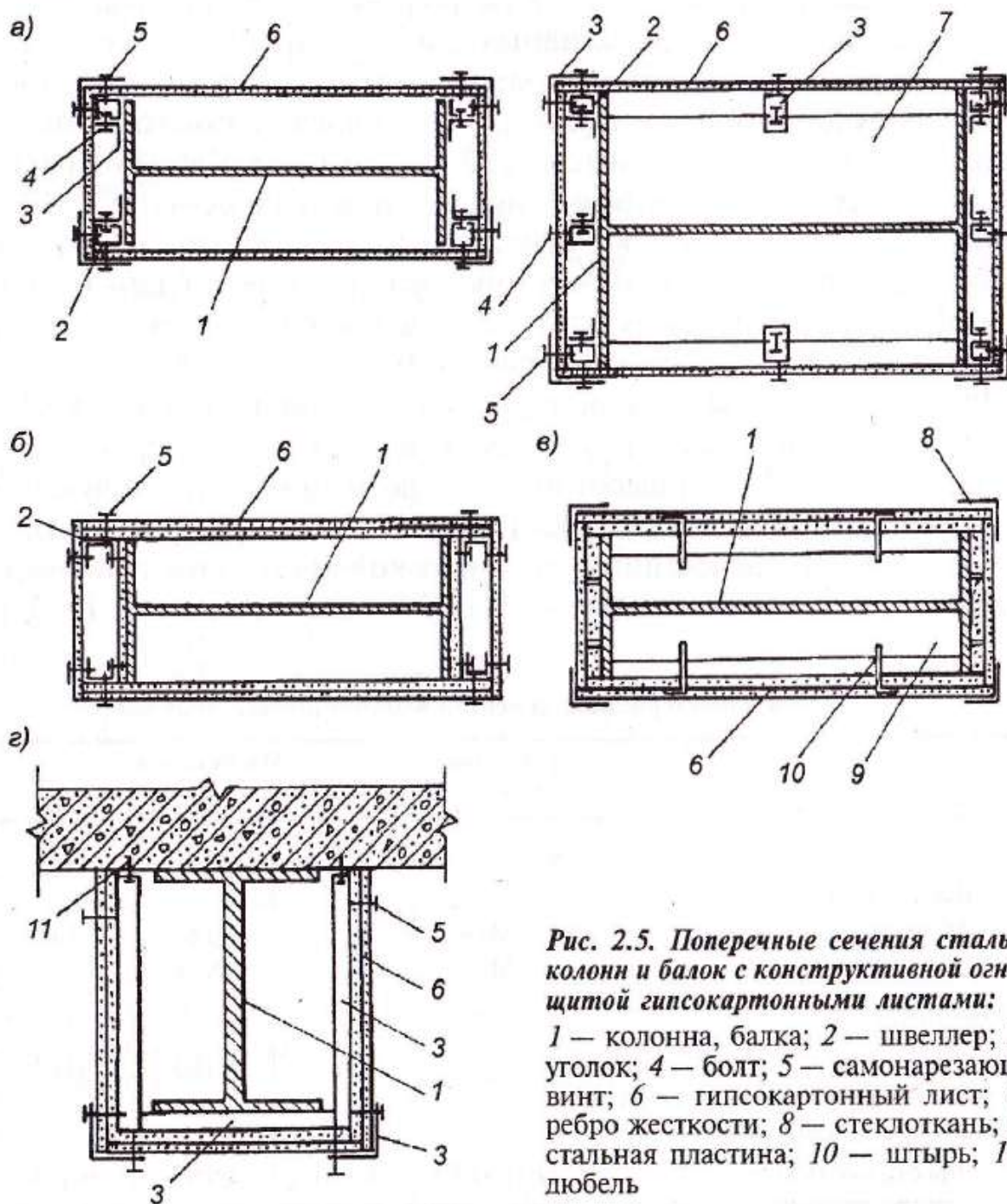


Рис. 2.5. Поперечные сечения стальных колонн и балок с конструктивной огнезащитой гипсокартонными листами:

1 — колонна, балка; 2 — швеллер; 3 — уголок; 4 — болт; 5 — самонарезающий винт; 6 — гипсокартонный лист; 7 — ребро жесткости; 8 — стеклоткань; 9 — стальная пластина; 10 — штырь; 11 — дюбель

В проектной практике встречается облицовка ГКЛ с применением дополнительных стальных крепежных элементов. На рис. 2.5, г показана конструкция облицовки ригеля с использованием каркаса, выполненного из уголков. Каркас при помощи дюбелей 11 крепят к нижней стороне перекрытия, а ГКЛ в один или несколько слоев прикрепляют к каркасу при помощи самонарезающих винтов 5.

Для облицовки колонн иногда применяют способ, показанный на рис. 2.5, а, б. В этом случае впритык к полкам двутавровой колонны устанавливают ГКЛ с прикрепленными к ним при помощи самонарезающих винтов швеллерами 2 из листовой стали, к которым, в свою очередь, крепят стальные уголки также при помощи самонарезающих винтов.

Кроме того, разработан проект огнезащиты стальных двутавровых балок перекрытия высотой от 500 до 1300 мм (рис. 2.6, а, б, в). В качестве средства защиты применены перлитофосфогелевые плиты марки 225 размером 1000х500 мм, толщиной 50 мм. Плиты 2 к защищаемой конструкции крепят при помощи шпилек 1 и клея. Шпильки длиной 130 мм, изготавливаемые из стальной проволоки диаметром 5 мм, приваривают к плоскостям полков на глубину 30 мм. В том случае, когда высота двутавровых балок больше НИИ) мм, шпильки устанавливают на уголках размером 75х50х5 мм, которые крепят к ребрам жесткости параллельно полкам двутавра. После накалывания плит на шпильки последние загибают. Крепление плит к наружным плоскостям полков и между собой осуществляется при помощи клея, состоящего из следующих компонентов (% по массе): быстротвердеющий портландцемент марки 400 — 85; эмульсия поливинилацетата (ПВА) — 15; вода техническая до 50% от общей массы цемента и ПВА. С наружной стороны конструкции, облицованные перлитофосфогелевыми плитами, оклеивают стеклохолстом, пропитанным полимерным клеем.

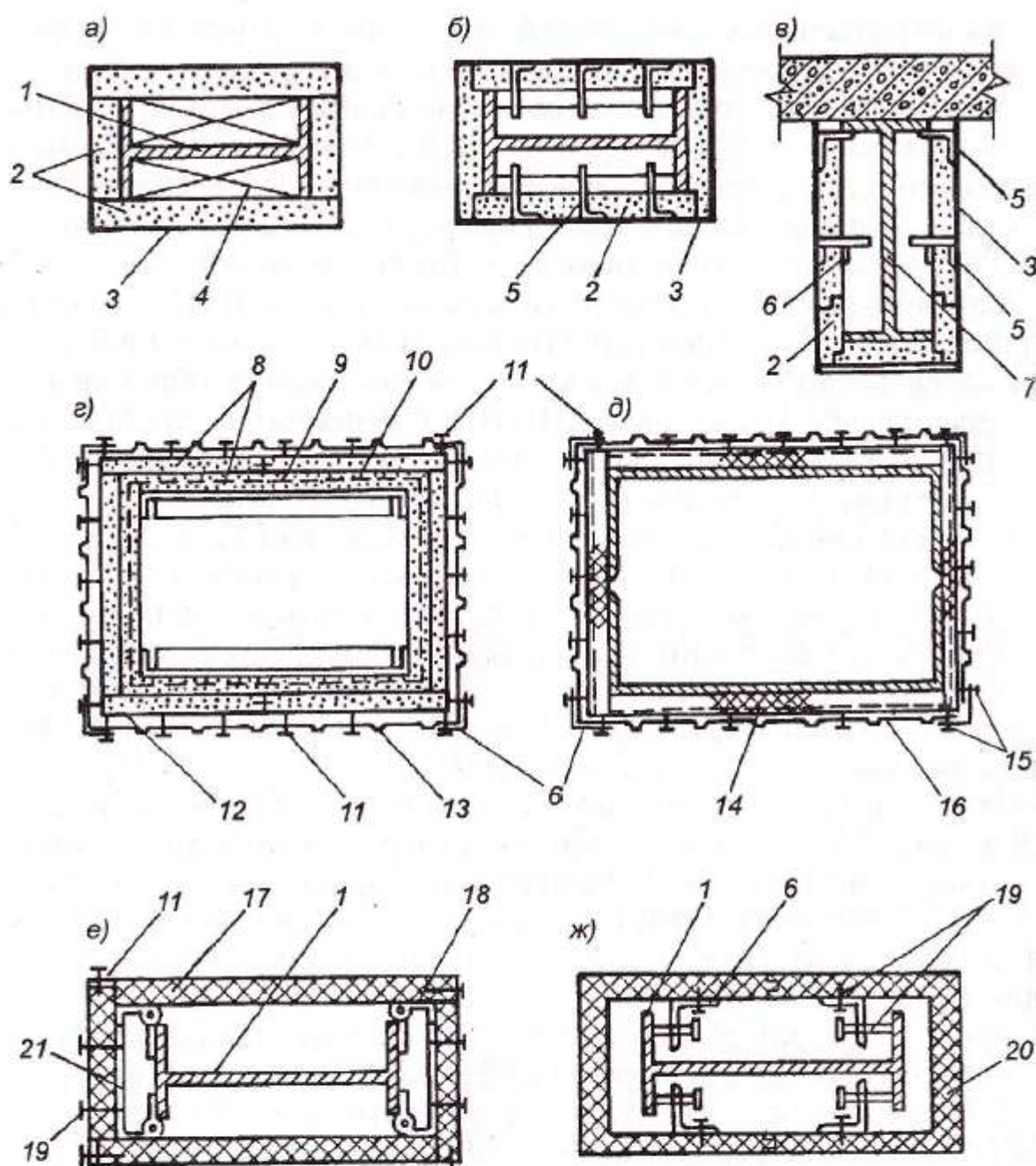


Рис. 2.6. Поперечные сечения стальных колонн и балок с конструктивной огнезащитой из перлитофосфогелевых плит (а, б, в), перлитовых плит и алюминиевых листов (г), полужестких минераловатных плит и стальных профилированных листов (д), двухслойных огнезащитных панелей (е), швеллерообразных скорлупок (ж):

1 — колонна; 2 — перлитофосфогелевая плита; 3 — стеклохолст; 4 — перлитофосфогелевая пробка; 5 — шпилька; 6 — уголок; 7 — балка; 8 — перлитовые плиты; 9 — арматурная сетка; 10 — цементно-песчаный раствор; 11 — самонарезающий винт; 12 — стальная пластина; 13 — профилированный алюминиевый лист; 14 — полужесткая минераловатная плита; 15 — комбинированная заклепка; 16 — стальной профилированный лист; 17 — огнезащитная двухслойная панель; 18 — штырь Г-образной формы; 19 — болт; 20 — швеллерообразная скорлупка; 21 — стальная планка

На рис. 2.6,а показана огнезащитная облицовка перлитофосфогелиевыми плитами, когда к защищаемой конструкции они крепятся только при помощи клея. В этом случае для контакта плит с поверхностью конструкции в полости между полками и стенкой двутавра, в местах стыков плит, располагают пробки из того же материала не реже, чем через 500 мм. Поверхность плит снаружи оклеивают стеклохолстом. Стеклохолст (или стеклоткань) улучшают свойства облицовок как при эксплуатационных условиях, так и при пожаре. В соответствии с данными ВНИИПО МВД РФ огнестойкость стальных конструкций, защищенных перлитофосфогелиевыми плитами толщиной 50 мм, после отверждения полимерцементного клея (через трое суток) составляет 150 мин.

Для огнезащиты стальных сквозных колонн разработана облицовка с использованием перлитовых плит и алюминиевых профилированных листов (рис. 2.6, б). Перлитовые плиты 8 марки 250 размером 300х300х50 мм соединяют между собой и с колоннами при помощи стальных пластин и проволоки, привязываемой к арматурной сетке 9. Плиты устанавливают в два ряда на раме из уголков 6, приваренных к колонне. С наружной стороны перлитовые плиты облицовывают профилированным алюминиевым листом 13, который крепят к уголкам 6 при помощи самонарезающих винтов 11.

Для защиты стальных колонн применяют также профилированный оцинкованный стальной лист и минераловатные полужесткие плиты (рис. 2.6, в) размером 1000х1000х60 мм. Для крепления стального листа 16 и установки минераловатных плит 14 к колоннам в поперечном направлении приваривают гнутые уголки 50х50х2,5 мм через 2 м по высоте. По угловым стыкам стальных листов накладывают уголки 50х30х2,5 мм, которые крепятся к листам комбинированными заклепками 15.

Известна конструкция огнезащиты (рис. 2.6, г), выполненная в виде двухслойных панелей 17, состоящих из облицовочных листов и теплоизоляции. Панели на одной из граней имеют четверть или выпуски наружного листа, а к панелям, расположенным вдоль полок, при помощи

болтов 19 крепятся специальные планки 21 с двумя петлями. При монтаже торцевые панели навешивают на штыри 18 Г-образной формы, привариваемые к защищаемым конструкциям, а остальные панели крепят к торцевым при помощи самонарезающих винтов 11.

В Англии разработана объемная огнезащита металлоконструкций, выполненная в виде швеллерообразных скорлупок (рис. 2.6, ж) [174], которые стыкуются между собой по принципу паз-шип. На внутренней поверхности этих элементов при помощи болтов 19 за одну из полок крепят уголки 6 или другие Г-образные элементы, а во вторые полки уголков ввинчивают распорные болты, при помощи которых осуществляются крепление скорлупок к защищаемой конструкции и соединение их между собой.

В случаях когда огнезащита выполняется из плитных материалов, которые могут быть использованы и как отделочные, крепление последних производится традиционными методами (см. рис. 2.6, з). К защищаемой поверхности крепят арматурную сетку 9, а при необходимости, например для огнезащиты сквозных колонн, монтируют сетку с мелкими ячейками. Плиты устанавливают на цементно-песчаном растворе и соединяют между собой и с арматурным каркасом при помощи плоских или круглых штырей, вставляемых в отверстия плит. Штыри привязывают к арматурному каркасу проволокой.

Рассмотрим результаты огневых испытаний типичных средств огнезащиты из листовых и плитных материалов.

Результаты определения огнезащитной способности гипсоволокнистых листов по методике ВНИИПО приведены в работе. Испытания проводили в огневой печи на моделях стальных колонн из двутавра № 20 высотой 1750 мм с двумя вариантами конструктивного исполнения огнезащиты из ГВЛ толщиной 10 мм. В качестве критерия оценки огнезащитной способности ГВЛ принималось время нагрева защищаемой конструкции до критической температуры 500 °С.

Варианты конструктивного исполнения испытанной огнезащиты показаны на рис. 2.7. По первому варианту огнезащиту выполнили следующим образом: колонну оклеили по периметру с помощью полимерцементного клея одним слоем ГВЛ и одним слоем стеклоткани. При изготовлении огнезащиты по второму варианту на полки двутавра приварили шпильки диаметром 10 мм на которые затем установили гипсоволокнистые листы внутреннего слоя. Два слоя ГВЛ, расположенных вдоль стенки двутавра установили на штыри диаметром 6 мм. Внутренний слой огнезащиты обернули по винтовой линии стеклотканью. Листы наружного слоя приклеили к стеклоткани полимерцементным клеем. Снаружи огнезащитную облицовку также оклеили одним слоем стеклоткани. Швы в стыках между листами заделали шпаклевкой на полимерцементном клее. Влажность ГВЛ перед проведением испытаний составляла 10,6% по массе.

В ходе огневого испытания наблюдались усадка и деформация ГВЛ, в результате чего стыки плит раскрывались, а стеклоткань разрывалась. Критическая температура 500 °С на металле защищаемой конструкции была достигнута:

- для первого варианта огнезащиты — через 46 мин от начала огневого воздействия по стандартному режиму;
- для второго варианта огнезащиты — через 68 мин.

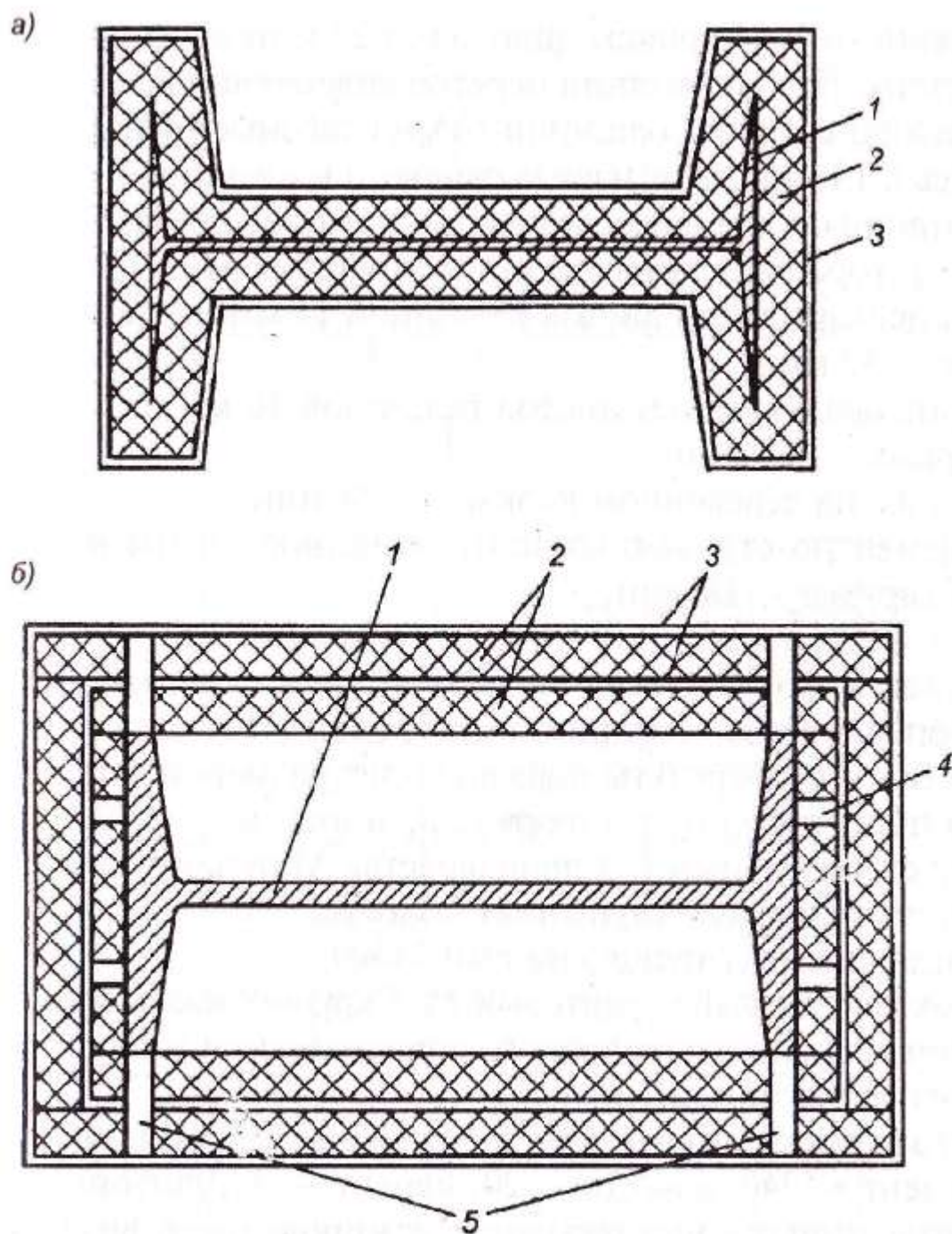


Рис. 2.7. Облицовка колонн гипсоволокнистыми листами:
а — образец № 1; *б* — образец № 2; 1 — двутавр № 20; 2 — ГВЛ
толщиной 10 мм; 3 — стеклоткань; 4 — шпилька диаметром
10 мм; 5 — штыри диаметром 6 мм

В работе приведены результаты огневых испытаний гипсокартонных и гипсоволокнистых листов, а также цементно-стружечных и цементно-целлюлозных плит. Огнезащитные свойства этих материалов были исследованы в различных конструкциях перегородок, где в качестве обшивок

использовали перечисленные листы и плиты. Обшивки устанавливали как на металлическом, так и на деревянном каркасе. Испытания проводили при стандартном температурном режиме.

При огневых испытаниях перегородок с обшивками из гипсоволокнистых листов толщиной 10 мм на 13 минуте в листе появлялись сквозные трещины со стороны, обращенной к огню.

Разрушение листов происходило через 20 мин от начала огневого воздействия. При испытании перегородок с обшивками из цементно-стружечных плит толщиной 10 мм сквозные трещины образовывались к 15 минуте от начала огневого воздействия. В результате испытаний определены следующие значения пределов огнестойкости перегородок с двухсторонними обшивками из:

- 5) гипсокартонных листов толщиной 14 мм на металлическом каркасе — 42 мин;
- 6) гипсоволокнистых листов толщиной 10 мм на металлическом каркасе — 24 мин;
- 7) то же на деревянном каркасе — 28 мин;
- 8) цементно-стружечных плит толщиной 10 мм на металлическом каркасе — 18 мин;
- 9) то же на деревянном каркасе — 24 мин.

Представляют интерес результаты огневых испытаний гипсоцементоперлитовых несущих перегородок. Огневые испытаниям были подвергнуты образцы плит размером 1,1х1,1х0,1 м. Для приготовления раствора использовали: гипс строительный Г-4 производства Минского завода; известь гидратную (пушенка) молотую; портландцемент пуццолановый М400;

песок вспученный перлитовый М75 крупностью частиц до 3 мм лигнин (отходы гидролизного производства из опилок и щепы) крупностью частиц до 3 мм.

Расход компонентов на 1 м³ раствора был следующий, кг: гипс - 550, цемент — 340, известь — 20, перлит — 42, лигнин — 68.

Плиты имели конструктивное армирование в виде сетки из стеклопластиковой арматуры диаметром 5 мм при шаге стержней 200 мм.

Основные характеристики гипсоцементоперлитового раствора непосредственно перед огневыми испытаниями имели следующие значения: влажность — 30 %, плотность — 1120 кг/м³, прочность - 3,5 МПа.

Плиты испытывали на прогрев по стандартному температурному режиму на экспериментальной установке с горизонтальной открытой сверху огневой камерой размером в плане 1,0х1,0 м. В процессе огневого испытания измеряли температуру на разных расстояниях от обогреваемой поверхности плиты; схема размещения термопар по сечению плиты показана на рис. 2.8, а. Продолжительность огневого воздействия составляла 7 ч.

Полученные экспериментально кривые прогрева гипсоцементоперлитовой плиты толщиной 100 мм представлены на рис. 2.8,б. Обращают на себя внимание характерные участки быстрого подъема и последующей стабилизации температуры («полки») на уровнях от 70 до 100 °С. Причем продолжительность участков стабилизации температуры тем больше, чем дальше от нагреваемой поверхности располагается точка ее измерения. Например, в точке 6, расположенной на расстоянии около 10 мм от необогреваемой поверхности, длина «полки» достигает 4,5 ч, а в точках, расположенных непосредственно на необогреваемой поверхности, стабилизация температуры продолжается до окончания огневого воздействия на плиту.

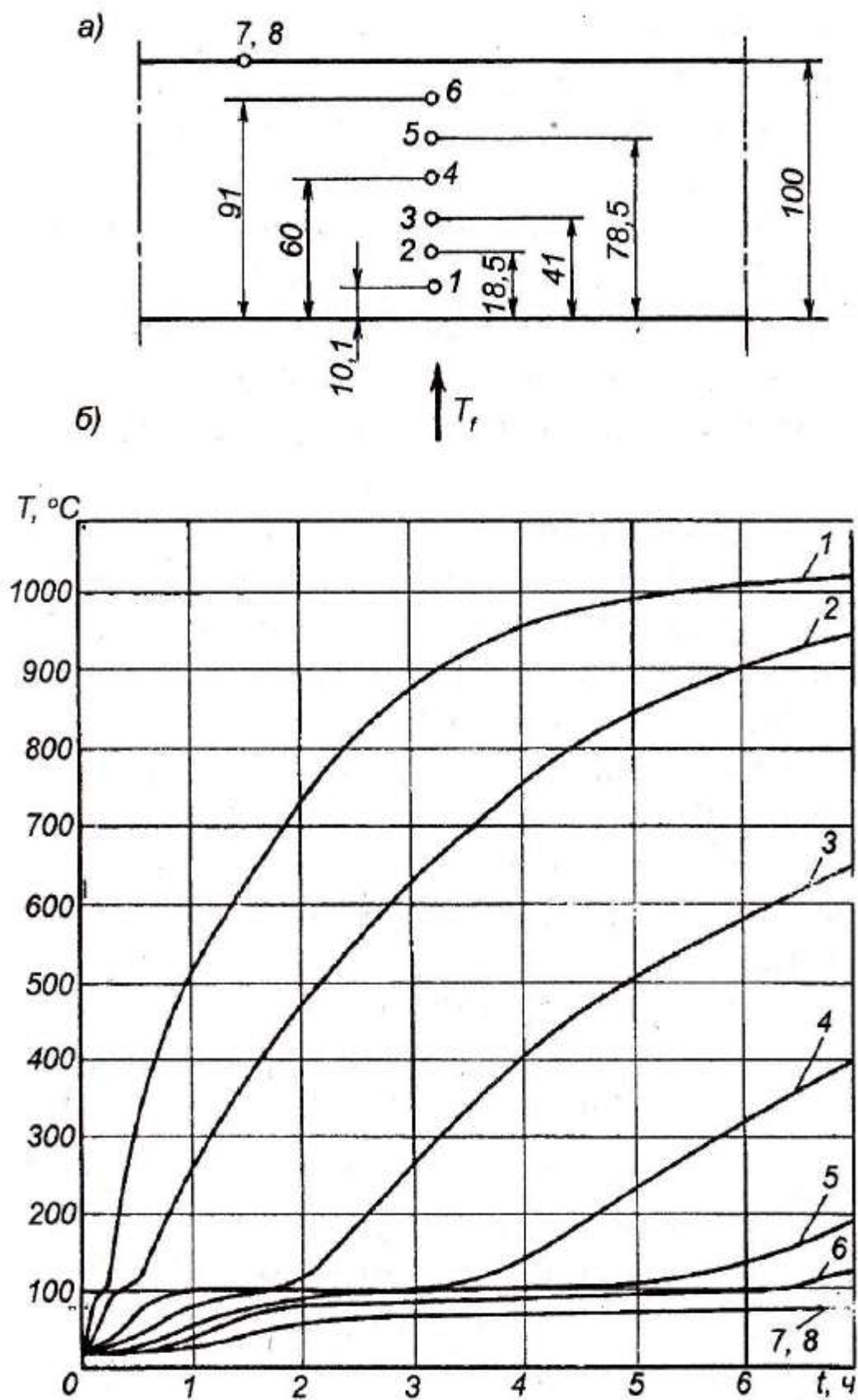


Рис. 2.8. Схема размещения термодпар по сечению (а) и кривые прогрева (б) плиты толщиной 100 мм из гипсоцементоперлитового раствора ($\rho_0 = 1120 \text{ кг/м}^3$)

Из сопоставления характера температурных кривых, полученных для гипсоцементоперлитовой плиты, с характером температурных кривых, полученных для легких бетонов (см. рис. 2.2 - 2.4), следует, что в первом случае продолжительность участков температурной стабилизации существенно больше, чем во втором. Это может быть связано с высоким уровнем влагосодержания гипсоцементоперлитовой плиты по сравнению с легкими бетонами.

Аналогичный характер имеют и температурные кривые, полученные при огневых испытаниях плит из поризованного арболита.

В заключение рассмотрим результаты определения огнезащитной способности облицовки из минераловатных плит для металлоконструкций перекрытий, приведенные в работе [101]. Огневые испытания по методике ВНИИПО подвергали облицовки из минераловатных плит со следующими характеристиками: марка — 75, плотность — $56,2 \text{ кг/м}^3$, содержание связующего — 2,4%, по массе, размер — 1000x500x600 мм.

По результатам испытаний определены эффективные теплофизические характеристики материала плит:

теплопроводность

$$\lambda = 0,05 + 0,00058 (T - 273);$$

теплемкость

$$c = 756 + 0,63 (T - 273).$$

Приведенные результаты огневых испытаний типичных листовых и плитных облицовок можно использовать для сравнительной оценки их огнезащитной эффективности. *Однако для переноса полученных результатов на условия реального пожара и на строительные конструкции других форм и размеров необходима адекватная натуре математическая модель функционирования огнезащиты учитывающая характерные особенности тепломассопереноса в материалах различных видов.*

ОБЛЕГЧЕННЫЕ ШТУКАТУРКИ И ПОКРЫТИЯ НА МИНЕРАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ

В последнее время для огнезащиты строительных конструкций вместо обычной цементно-песчаной штукатурки все чаще применяют облегченные штукатурки и покрытия на минеральных вяжущих. Эти материалы обладают повышенной огнезащитой эффективностью при существенно меньшей массе, поэтому лишь незначительно увеличивают нагрузку на фундаменты зданий и сооружений.

В состав огнезащитных облегченных штукатурок и покрытий входят пористые и волокнистые заполнители, рассмотренные ранее. В качестве вяжущих для приготовления *облегченных огнезащитных штукатурок* используют портландцемент и быстро твердеющий портландцемент марок не ниже 400, а также гипс, растворимое стекло и др. Выбор вяжущего зависит от влажностного режима работы защищаемой конструкции. Смеси на жидком стекле, извести и гипсе используют для штукатурок в помещениях с относительной влажностью не более 60 %. *Смеси на портландцементе могут быть применены в условиях любой влажности окружающей среды, за исключением случаев открытого попадания влаги на поверхность покрытия. Наиболее эффективными считаются составы на быстротвердеющем портландцементе.*

В качестве пористых заполнителей применяют вспученные перлитовый песок, вермикулит и керамзит. Перлитовый песок применяют плотностью до 100 кг/м^3 при крупности зерен не более 2,5 мм. Вспученный вермикулит применяют в смеси с перлитовым песком или керамзитовым гравием. Размер зерна вермикулита принимается равным 2,5 мм, средняя плотность — не более 150 кг/м^3 . Из волокнистых материалов используют минеральную вату температурой плавления не ниже 1200°C и хризолитовый асбест VI сорта. Минеральную вату вводят в смесь в виде гранул размером 6-8 мм. Для улучшения удобоукладываемости штукатурной смеси, приготовляемой на портландцементе, применяют пластификаторы (сульфитно-дрожжевую

бражку, мылонафт и др.) в количестве до 0,5%. Для замедления схватывания составов при их приготовлении в воду вводят кератиновый и известково-клеевой замедлители, буру, фосфат калия и другие в количестве до 2%. Для равномерного отверждения составов добавляют кремнефтористый натрий.

Соотношение компонентов огнезащитных облегченных штукатурок, рекомендуемых для практического применения, приведено в табл. 17. Там же указаны их физико-механические характеристики.

Примерами наиболее известных зарубежных составов огнезащитных покрытий с легкими заполнителями могут служить составы Cafco (США) и Mandoval (Англия). Эти составы, разработанные в 50-х годах, не содержат асбеста и других токсических компонентов. Состав Cafco изготавливают на основе минеральной ваты и минеральных вяжущих, состав Mandoval — на основе вспученного вермикулита и Портландцемента. Оба состава обладают высокой адгезионной способностью к различным материалам и применяются для огнезащиты металлических, железобетонных, каменных и деревянных конструкций. Плотность этих покрытий 320 — 720 кг/м³, теплопроводность 0,09 — 0,17 Вт/(м • К), прочность при сжатии 0,38 — 1,74 МПа, адгезионная прочность к стали 0,06 — 0,16 МПа.

Таблица 17

Техническая характеристика типичных огнезащитных штукатурок разных составов

№ состава	Содержание в сухой смеси, % от объема (в числителе) и массы (в знаменателе)								Плотность, кг/м ³	Предел прочности, МПа		Теплопроводность, Вт/(м·К)
	портланд-цемента	гипса	жидкого стекла	ваты минеральной гранулированной	перлита	вермикулита	керамзита	асбеста		при сжатии	при изгибе	
1	—	10/59	—	30/16	60/25	—	—	—	450	0,59	0,29	0,081
2	8/58	—	—	32/18	60/28	—	—	—	600	0,98	0,59	0,128
3	—	10/54	—	—	60/24	—	—	30/22	550	0,78	0,49	0,116
4	0,3/5	—	42/46	20/22	79,7/73	—	—	—	440	0,39	0,20	0,078
5	0,6/7	—	65/71	—	79,4/63	—	—	20/30	500	0,98	0,40	0,104
6	1,7/15	—	60/66	—	—	95/75	3,3/10	—	350	0,40	0,20	0,070
7	13,5/45	—	—	—	—	76,5/40	10/15	—	600	0,98	0,78	0,108

При нанесении штукатурки на вертикальные и потолочные поверхности применяют армирующие металлические сетки или другой вспомогательный крепеж. Армирующую сетку выбирают в зависимости от толщины огнезащитного покрытия. Сетку устанавливают на расстоянии 5, 10 или 15 мм от защищаемой поверхности металла. При двухслойной штукатурке армирующую сетку накладывают на поверхность внутреннего подготовительного слоя и замоноличивают в материал упрочненного наружного слоя.

Объемную сетку рабица, сетку из просеченного и растянутого листов накладывают непосредственно на защищаемую поверхность.

В качестве армирующих элементов штукатурного слоя используют Г-образные шпильки из проволоки диаметром 3 — 4 мм, прикрепляемые к защищаемой поверхности через 200 мм одна от другой. Расстояние от концов шпилек до защищаемой поверхности составляет 10—15 мм. Концы шпилек, смежные с углами защищаемой конструкции, выступают за кромку на расстояние около 10 мм. Использование этих крепежных элементов

повышает надежность и долговечность покрытия, однако увеличивает трудоёмкость и стоимость, а также приводит к удлинению сроков строительства.

Огнезащитные штукатурки не являются антикоррозионными, поэтому перед их нанесением металлические поверхности должны быть покрыты антикоррозионным составом. Штукатурки не отвечают эстетическим требованиям и не могут быть нанесены на конструкции сложной конфигурации.

Анализ результатов физико-механических и теплофизических испытаний штукатурок на легких пористых заполнителях дает возможность заключить, что в интервале их плотностей от 350 до 1000 кг/м³ изменение теплопроводности λ может быть представлено прямолинейной зависимостью (рис. 2.9), а прочностных характеристик — параболическими зависимостями (рис. 2.10).

В качестве вяжущего *облегченных огнезащитных покрытий* наиболее широко применяют жидкое стекло, обладающее способностью реагировать при высоких температурах с кремнеземом различными силикатами и другими окислами заполнителей образованием жаростойких соединений. Жидкое стекло является одним из наиболее перспективных и доступных вяжущих для изготовления огнезащитных составов высокой прочности при низкой их плотности (200 — 300 кг/м³). Используя различное по химическому составу и модульности растворимое стекло, изменяя концентрацию его раствора и соотношение между стеклом и материалом выполняющим роль заполнителя, изменяя условия твердения и вводя различные добавки, получают разнообразные материалы обладающие высокой сопротивляемостью к тепловым воздействиям.

Огнезащитные покрытия на основе жидкого стекла имеют высокую адгезию ко многим материалам. Однако вследствие высокой плотности структуры эти огнезащитные покрытия отличаются повышенной хрупкостью и значительной усадкой при увлажнении и высушивании. Для них

свойственна высокощелочная реакция, что является причиной разрушения грунтовочных составов и отслаивания покрытия от металла.

Составы облегченных огнезащитных покрытий на основе жидкого (растворимого) стекла характеризуются данными табл. 18.

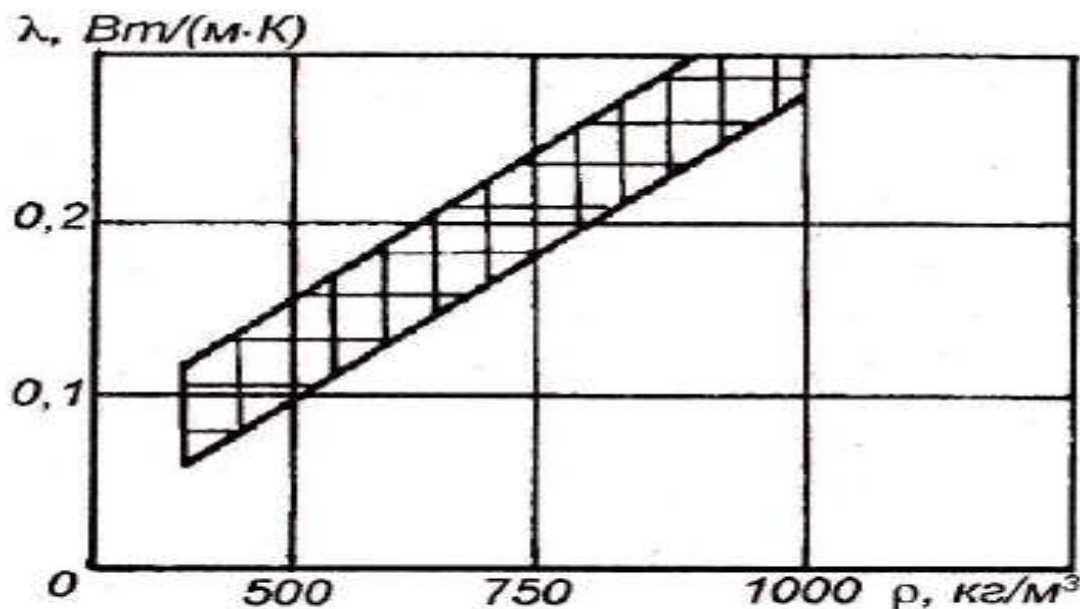


Рис. 2.9. Зависимость теплопроводности от плотности материала облегченных штукатурок

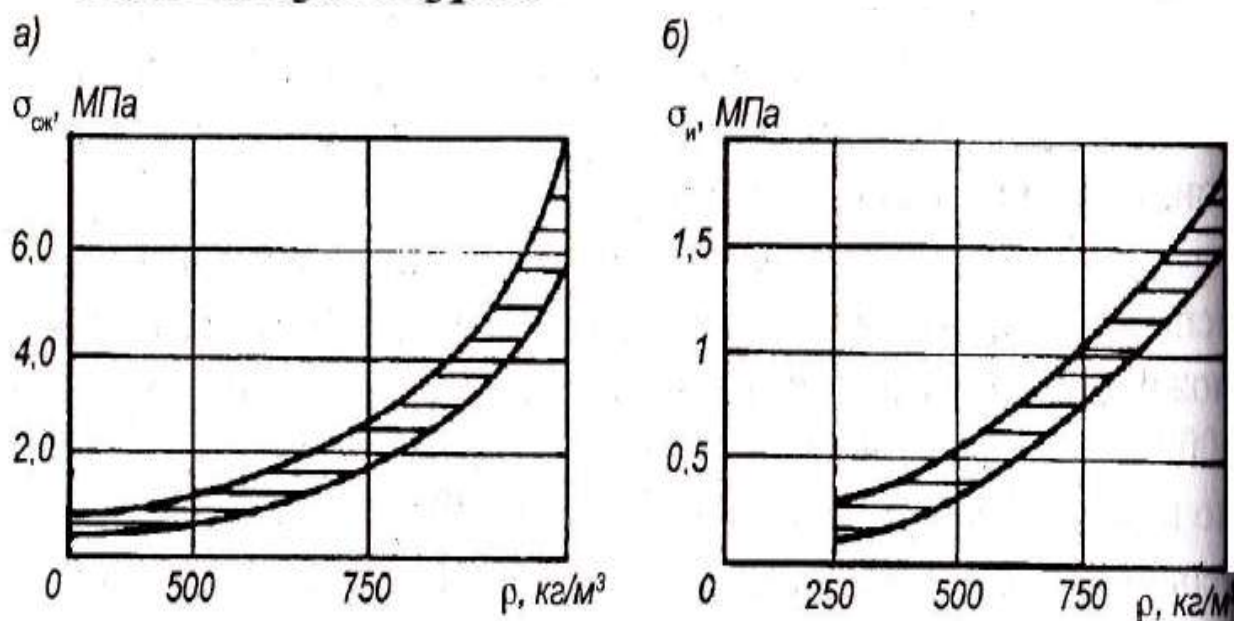


Рис. 2.10. Зависимость прочности при сжатии (а) и при изгибе (б) материала облегченных штукатурок от его плотности

Таблица 18

Состав типичных облегченных огнезащитных покрытий

Компонент	Состав огнезащитных покрытий, защищенных авторскими свидетельствами						
	№ 377321, МКИ ³ C08 C 31/10, C06 M 15/66	№ 505185, МКИ ³ C04 B 19/04	№ 644746, МКИ ³ C04 B 29/02	№ 648550, МКИ ³ C04 B 29/02	№ 1014812, МКИ ³ B21 B 37/02	№ 1167172, МКИ ³ 4C04 B 38/02	№ 1887712, МКИ ³ 4C04 B 38/02
Жидкое стекло	+	+	+	+	+	+	+
Вспученный перлит	+	+	+	—	+	—	+
Асбестовое волокно	—	+	—	—	—	—	+
Базальтовое волокно	—	—	+	—	—	—	—
Гранулированная минеральная вата	—	—	—	—	+	+	—
Портландцемент	—	—	—	—	—	+	+
Нефелиновый шлам	—	+	+	+	—	—	—
Окись кальция	+	—	—	—	—	—	—
Шлаковая пемза	—	—	—	—	—	+	—
Металлоаммонийфосфат	—	—	—	—	—	+	—
Полые фосфатные микросферы	—	—	—	+	+	—	—
Твердые соли ортофосфорной кислоты	—	—	—	—	+	—	—
Тонкомолотые отходы фосфатных наполнителей и асбеста	—	—	—	+	—	—	—

В качестве отвердителя растворимого стекла используют нефелиновый шлам, феррохромовые и феррованадиевые шлаки, являющиеся антипиреном. Нефелиновый антипирен представляет собой мелкодисперсный порошок серовато-белого цвета, практически не растворимый в воде. Добавки глинозема, шамота, магнезита, молотого доменного шлака повышают огнеупорность и снижают усадку огнезащитного состава. Использование микросфер обеспечивает высокие теплофизические характеристики покрытия. Тонкомолотые отходы производств фосфатных наполнителей огнеупорностью 1600 — 2000°C, обладающие высокой химической

активностью, не только повышают огнезащитные свойства, но и ускоряют твердение составов.

В последнее время для получения облегченных огнезащитных покрытий все шире применяют фосфатные вяжущие. В качестве характерного примера рассмотрим огнезащитные фосфатные покрытия (ОФП) из серии таких покрытий, разработанных ЦНИИСК им. Кучеренко.

Покрытие ОФП-ММ состоит из асбеста, жидкого стекла и его отвердителя — нефелинового антипирена. Это покрытие обеспечивает предел огнестойкости металлических конструкций до 180 мин при толщине огнезащитного слоя около 50 мм. Состав ОФП-ММ наносится на поверхность конструкции механизированным способом. Принцип напыления заключается в распушке асбеста, создании аэросмеси материалов и нанесении ее на поверхность металлоконструкций. ОФП-ММ обладает высокими огнезащитными, теплофизическими и эксплуатационными свойствами: низкой теплопроводностью, небольшой плотностью, хорошей эластичностью, устойчивостью к вибрации и долговечностью. Огнезащитный слой покрытия не растрескивается и не разрушается при воздействии огня. Покрытие не требует послойной сушки и может быть нанесено как на холодную, так и на горячую поверхность за один прием.

В последние годы на основе покрытия ОФП-ММ разработано покрытие ОФП-МВ, в композицию которого вместо асбеста (в том же количестве) вводится гранулированное минеральное волокно. По своим физико-механическим, теплофизическим и огнезащитным свойствам оно не уступает покрытию ОФП-ММ, обладая при этом более низкой плотностью.

Рецептура огнезащитных фосфатных составов ОФП-ММ и ОФП-МВ приведена в табл. 19.

Значения основных теплофизических и прочностных характеристик огнезащитного покрытия ОФП-МВ приведены в табл. 20.

Огнезащитные составы ОФП-ММ и ОФП-МВ выпускают в виде двух компонентов, приготовленных в заводских условиях. Один из них калиевое

или натриевое растворимое стекло с модулем 2,6-2,8. На строительной площадке растворимое стекло разбавляют горячей водой температурой не более 80 С при постоянном перемешивании в течение 3 мин до плотности 1,2 г/см³. Допускается разбавление растворимого стекла холодной водой (20 °С) при условии увеличения времени перемешивания до 10 мин. Разбавленный раствор фильтруют через сито № 05. Другой компонент — сухую смесь гранулированной минеральной ваты (или асбеста) с нефелиновым шламом — поставляют на стройплощадку централизованно.

На стройплощадке рабочий состав готовят в установке для его нанесения на поверхность конструкций.

Таблица 19 и Таблица 20

Рецептура огнезащитных фосфатных составов

Компонент	Содержание компонентов, % по массе, в составах	
	ОФП-ММ	ОФП-МВ
Растворимое стекло (плотность 1,2 г/см ³)	40	40
Нефелиновый шлам	7	10
Асбест III — V сортов	53	—
Гранулированная минеральная вата	—	50

Техническая характеристика огнезащитного покрытия ОФП-МВ

Показатель	Единица измерения	Значение показателя
Плотность, не более	кг/м ³	300
Теплопроводность	Вт/(м·К)	0,07 — 0,08
Прочность:		
при сжатии основного слоя	МПа	0,5 — 0,7
при сжатии наружного уплотнительного слоя	МПа	1,3 — 1,5
при изгибе	МПа	0,2 — 0,3
при расслоении	МПа	0,01
Гигроскопичность	%	5

При огневых испытаниях облегченных штукатурок и покрытий на минеральных вяжущих, как правило, фиксируется достаточно продолжительный эффект стабилизации температуры защищаемой конструкции на уровне, близком к 100 °С, аналогичный рассмотренному в предыдущем параграфе. Характерный вид зависимости температуры стальных колонн с покрытием на основе жидкого стекла от продолжительности нагрева по стандартному режиму в ходе огневого испытания в печи ВНИИПО показан на рис. 2.11. *Ввиду того что содержание воды в огнезащитных материалах такого типа больше, чем в бетонах, физические эффекты, обусловленные выделением водяного пара при высокотемпературном нагреве огнезащиты, выполненной на основе жидкого стекла, проявляются более сильно.*

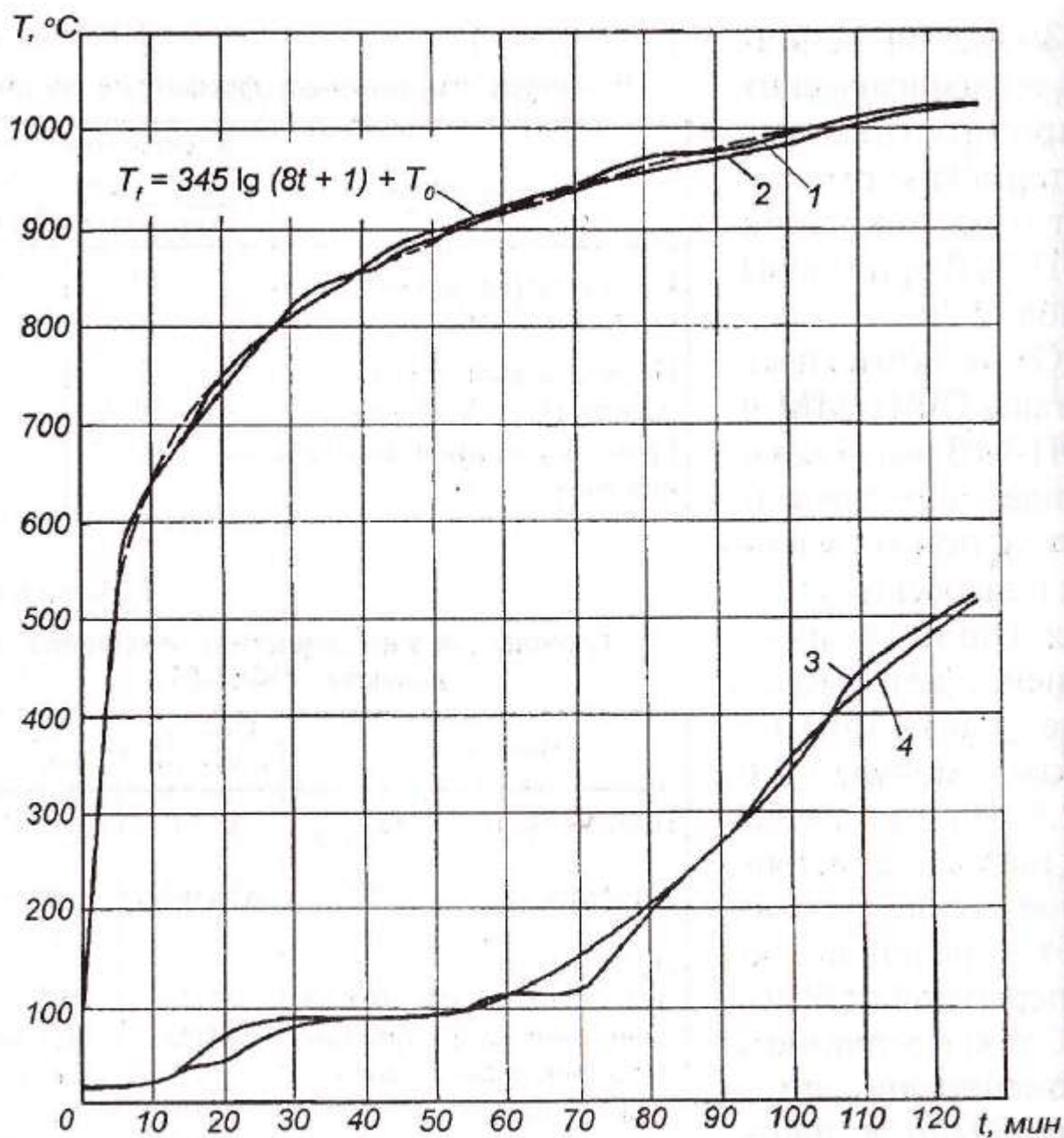


Рис. 2.11. Зависимость от времени температуры в стальных колоннах с фосфатным огнезащитным покрытием на основе жидкого стекла «Пенокс»:

1, 2 — средняя температура среды в огневой камере печи (опыты № 1 и 2 соответственно); 3, 4 — средняя температура опытных образцов стальных колонн

ВСПУЧИВАЮЩИЕСЯ ПОКРЫТИЯ

Вспучивающиеся покрытия (ВП) занимают особое место среди применяемых в настоящее время средств огнезащиты строительных конструкций. Достаточно высокая огнезащитная эффективность ВП в сочетании с широкими возможностями использования механизированных методов нанесения составов на поверхность конструкций обуславливает повышенный к ним интерес. Они наносятся тонким слоем на поверхность конструкций и выполняют в процессе ее эксплуатации функции лакокрасочного декоративно-отделочного материала. При действии высоких температур покрытие вспучивается, многократно увеличиваясь в объеме образованием пористого слоя, обладающего хорошими теплоизоляционными свойствами.

Вспучивающиеся покрытия являются многокомпонентными системами, состоящими из связующего, антипирена и пенообразователей — вспучивающих добавок. В качестве связующих в основном используют полимеры, проявляющие склонность к реакциям циклизации, конденсации, сшивания и образования нелетучих карбонизированных продуктов: аминокальдегидные полимеры, латексы на основе сополимеров винилиденхлорида с винилхлоридом, галоидированные синтетические и натуральные каучуки, эпоксидные полимеры, полиуретаны и др. Кроме того, применяют комбинированные связующие, состоящие из полимера и минерального вяжущего (жидкое стекло).

Компоненты, обуславливающие вспучивающие и огнезащитные свойства покрытий, подразделяются на следующие группы:

- 1) Вещества, разлагающиеся в интервале 100 — 250 °С с образованием кислот. Это неорганические соли фосфорной и борной кислот (ортофосфаты аммония, полифосфаты аммония, бура и др.) и фосфорорганические вещества (фосфаты мочевины или меламина, фосфакрилат, полифосфориламид и др.).

2) Вещества, разлагающиеся с выделением паров воды или негорючих газов (полисахариды): крахмал, декстрин, пентаэритрит и его гомологи, стереоизомерные гекситы — манит, сорбит и др.

3) Синергиты. К ним относятся мочевины, меламин, дициандиамида, гуанидин, мелем. Известно также применение сульфогуанидина ароматических сульфамидов, 5-амино-2-нитробензойной кислоты, сульфатов аминбензойной кислоты, производных триазинов и других соединений.

4) Галогенсодержащие вещества типа хлорпарафина, совола, трихлорэтилфосфата; галогенсодержащие полимеры и сополимеры оказывают пластифицирующее действие и являются источниками галогеноводородов, которые способствуют как вспениванию покрытий, так и огнезащите конструкций.

При создании вспучивающегося покрытия в его состав вводят кроме перечисленных выше компонентов, наполнители, красители и технологические добавки.

В качестве антипиренов для аминсмола наиболее эффективны орто- и полифосфаты аммония в сочетании с газообразующими добавками — мочевиной, меламином, дициандиамидом, а также с порошкообразными карбамидными или меламиноформальдегидными смолами. Общее содержание антипиренов, газообразователей и других добавок во вспучивающихся покрытиях составляет 60 — 70% без учета разбавителя. К коксуемым добавкам относятся крахмал, декстрин, сахара, пентаэритрит, которые при нагревании под действием кислотного катализатора легко дегидратируются, а также жаростойкие наполнители и стабилизаторы вспененного слоя.

При использовании растворимых орто- и полифосфатов аммония в водоразбавляемых связующих возникает необходимость регулирования pH пленкообразующих компонентов для предотвращения их коагуляции или преждевременного старения. С этой целью вводят загустители типа карбоксиметилцеллюлозы, декстрина, казеина либо амины типа

тетраметилендиамина, гексамети лентетрамина. Однако такие составы обладают непродолжительным сроком хранения. В связи с этим актуальным является создание нерастворимых или частично растворимых полифосфатов аммония. Наилучшими свойствами обладает полифосфат аммония отличающийся высоким содержанием фосфора, пониженной растворимостью, позволяющей использовать его как в вододисперсионных системах, так и в красках на органических растворителях

Волокнистые наполнители вводят не только для загущения красок, с тем чтобы наносить их более толстым слоем на металл конструкций для защиты от прогрева. В основном их используют как стабилизаторы вспененного слоя. Являясь неориентированными в размягчающемся при нагреве связующем, они движутся вслед за вспучивающимися слоями и застывают в виде сложнопереплетенного каркаса в затвердевшей пене. Когда же при длительном воздействии высоких температур начинается процесс усадки выгорания и озоления вспененного слоя, каркас, спекаясь и оплавляясь, замедляет этот процесс, обеспечивая тем самым теплоизолирующие свойства покрытия, гарантирующие повышение предела огнестойкости конструкций.

При создании вспучивающихся покрытий используют также термически расширяющиеся графиты (ТРГ). В отличие от природных вспучивающихся перлитов и вермикулитов они являются соединениями, полученными из природных графитов, что позволяет в зависимости от технологии обработки варьировать их свойства по температурным интервалам разложения и объему вспучивания. Способность графитов природного происхождения, обладающих совершенной кристаллической структурой, образовывать такие соединения обусловлена слоистой структурой кристаллов и слабой энергией межплоскостной связи.

Делокализация электронов углеродных атомов в структуре базисных плоскостей кристаллитов создает возможность участия этих атомов в реакциях с «гостевыми» атомами и молекулами. В зависимости от природы реагентов это могут быть реакции восстановления, окисления или

присоединения. Известны, например, соединения внедрения графита с атомами щелочных металлов, в которых группы углеродных атомов отнимают электроны у атомов металла и отрицательно заряжаются. Напротив, в соединениях с неорганическими кислотами (серной, азотной, соляной) образуются солеподобные соединения, в которых углеродные атомы заряжаются положительно и становятся катионами. Такое соединение, называемое бисульфатом графита, после прокаливания при 500 — 1000°С расширяется в объеме (вспучивается), так как выделившиеся при пиролизе газы раздвигают пакеты плоскостей.

Бисульфаты графита могут быть получены из природных графитов различных марок: литейного, смазочного малозольного и тигельного. Сущность метода сводится к обработке графитов при нормальной температуре раствором бихромата натрия в концентрированной серной кислоте, отмывке полученного соединения водой с целью удаления избытка окислительного раствора и сушке отмытого продукта. Соль шестивалентного хрома используется как окислитель для перевода электронейтрального углерода в катион. При этом шестивалентный хром восстанавливается в трехвалентный. В этой реакции серная кислота играет двойную роль создаёт кислую среду и образует сульфат-анион.

Типичным вспучивающимся составом на органическом (полимерном) связующем можно считать состав ВПМ-2. Содержание компонентов в этом составе приведено в табл. 21. Известен модифицированный состав ВПМ-2, в который вместо мелема введен бисульфат графита.

В этой же таблице приведены составы и основные характеристики вспучивающихся покрытий на основе комбинированного связующего, вермикулита и перлита.

Представляют интерес работы П.П. Гедеонова по практической оптимизации рецептур огнезащитных покрытий на основе вермикулита (они занимают промежуточное положение между покрытиями на минеральном вяжущем, содержащем воду, и вспучивающимися покрытиями на

органическом связующем). В результате выполненных работ был создан ряд огнестойких композиций, включающих в себя вермикулитовый концентрат руды, регидратированный и дегидратированный вспученный вермикулит. Потанинского месторождения определенной фракции. В качестве вяжущего в них использовалось жидкое натриевое стекло (SiO_2 - 30,5% и Na_2O — 11,29%). Сырьевые массы, приготовленные путем перемешивания вермикулита с вяжущим, обладают достаточно хорошими огнезащитными свойствами. При толщине 8 — 12 мм| они обеспечивают огнестойкость 45 — 60 мин. Однако такие покрытия с трудом наносятся на поверхность. Кроме того, они хрупки и в условиях с достаточно высокой относительной влажностью воздуха ($\phi > 0,95$) набухают, постепенно разрушаются, отслаиваясь от защищаемой поверхности. Оголенные участки подвергаются действию коррозии.

Всё это предопределило необходимость изыскания таких добавок, введение которых в сырьевые массы привело бы к направленному формированию свойств покрытия, т.е. к устранению указанных недостатков.

Таблица 21

Типичные составы вспучивающихся покрытий и их огнезащитная эффективность

Покрывтие	Компонент	Содержание компонентов, % по массе	Толщина покрытия, мм	Предел огни- стойкости стальных ко- лонн с покрыв- тием, мин
Вспучивающе- ея покрытие ВПМ-2	Смола ММФ-50 Карбоксиметилцеллюлоза Аммофос Мелем Дициандиамид (ДЦДА) Асбест Стекловолокно	30,15 15,12 26,07 17,46 5,9 2,65 2,65	4	45
Вспучивающе- ея покрытие на основе вер- микулита	Жидкое стекло Вермикулит Асбест Окись цинка Дициандиамид (ДЦДА) Мочевино-формальдегид- ная смола Кремнефтористый натрий	54,38 24,06 2,17 3,67 1,02 13,6 1,1	5 9 12	30 45 60
Вспучивающе- ея покрытие «Экран-М»	Мочевино-формальдегид- ная смола Жидкое стекло Дициандиамид (ДЦДА) Окись цинка Перлит Асбест	21,3 65 1,5 7 5 3—4	4	45—54

Выполненные работы показали, что физико-механические и огнезащитные свойства покрытий можно улучшить введением армирующего волокнистого заполнителя, мочевино-формальдегидной смолы, окиси цинка, дициандиамида, кремнефтористого натрия и других добавок. Установлено, что использование волокнистого заполнителя приводит к улучшению прочностных и технологических свойств наносимой массы. Мочевино-формальдегидная смола обеспечивает лучшую угадаваемость на защищаемую поверхность. Включение дициандиамида способствует повышению прочностных свойств покрытия при огневом воздействии,

лучшей вспучиваемости и огнестойкости. Окись цинка повышает атмосферостойкость, благодаря чему расширяется область применения покрытий при возрастании относительной влажности воздуха до 95%. Добавление кремнефтористого натрия обеспечивает более быстрое нарастание прочности покрытия, что позволяет наносить его большей толщины (например, 8 — 10 мм за один раз).

Рассмотренные добавки влияют на основные физико-механические свойства покрытий не только в процессе эксплуатации, но и при огневом воздействии. Испытания стальных пластин с огнезащитными покрытиями показали, что при возрастании температуры со 100 до 600 °С в первые 10 — 15 мин огневого воздействия и на покрытие наблюдается медленный рост температуры защищаемого металла, а вспучивание достигает максимального значения (**в 4 - 5 раз больше** исходной толщины) за счет интенсивного газовыделения при разложении смолы и жидкого стекла, а также при дегидратации вермикулита.

Образующаяся пористая структура имеет низкую теплопроводность благодаря наличию в слое жидкого стекла вспучившихся зерен концентрата вермикулитовой руды.

Повышение температуры до 700°С приводит к некоторому оседанию слоя примерно на 15 — 30% и более быстрому прогреву в результате выгорания органической части покрытия и образования пористой структуры расплава стекла. При этом процесс дегидратации вермикулита приближается к завершению.

Дальнейший рост температуры до 800°С и выше приводит к образованию пористой структуры, состоящей из расплава стекла, добавок и вермикулита. В этот период полностью завершается процесс дегидратации вермикулит и наблюдается быстрый прогрев защищенной пластины до критической температуры т.е. свои функции покрытие полностью исчерпывает.

Основные физико-механические характеристики одной из характерных составов представлен в табл. 2.22 (состав, %по массе: вермикулитовая руда — 14; вермикулит регидратированный — 2,8; вермикулит дегидратированный — 0,9; распушенный асбест IV сорта — 1,6; жидкое стекло натриевое с модулем 2,8-40; мочевиноформальдегидная смола — 10; окись цинка — 2,7 дициандиамида — 7,5) .

Огнезащитная способность вспучивающихся покрытий на стальных листах и колоннах проверялась в огневой печи. В результате испытаний установлено, что разработанная вспучивающаяся огнестойкая композиция на основе вермикулита может быть использована для огнезащиты металлических конструкций, применяемых в промышленном и гражданском строительстве.

Таблица 22

**Техническая характеристика огнезащитного
покрытия на основе вермикулита**

Показатель	Единица измерения	Значение показателя
Плотность	кг/м ³	1311
Прочность: при сжатии	МПа	10,5
при изгибе	МПа	2,0
Толщина покрытия	см	1
Адгезия	МПа	0,6
Огнестойкость стальной колонны, защищенной покрытием	мин	47

Огнезащитные составы для древесины

Древесина, широко применяемая в строительстве, наряду с известными достоинствами, выгодно отличающими ее от других материалов, обладает такими существенными недостатками, как повышенная воспламеняемость и горючесть. Известно немало пожаров, возникновению и развитию которых способствовало горение древесины. В условиях пожара незащищенные деревянные конструкции способствуют распространению огня. Эти особенности деревянных конструкций и обуславливают специфику подхода к их огнезащите, требующую отдельного рассмотрения.

Температура воспламенения продуктов разложения большинства пород деревьев находится в пределах 270 — 300 °С, а температура самовоспламенения — в пределах 330 — 470 °С. Следует иметь в виду, что длительный нагрев в связи с возможностью образования пирофорного угля делает опасной для незащищенной древесины температуру 130 °С.

Продолжительное действие источника нагрева и наличие условий для аккумуляции теплоты резко снижают температуру самовоспламенения древесины. При нагревании древесины до температуры 110 °С из нее удаляется влага, а при 130 °С и выше происходит дальнейшее разложение. Процесс разложения вначале идет медленно, но с повышением температуры ускоряется. Разложение древесины сопровождается выделением теплоты, поэтому при наличии условий для ее аккумуляции уже при температуре 130 °С может начаться процесс самонагрева, который при определенных условиях может закончиться самовоспламенением. Известны случаи самонагрева опилок при достижении температуры 110°С, а также загорания концов балок, заделанных в стены вблизи дымоходов. Зафиксирован также случай загорания деревянных конструкций в котельной в результате их продолжительного облучения нагретой поверхностью обмуровки котла.

Повышенная воспламеняемость и горючесть древесины обусловлены выделением большого количества горючих газов при термическом

разложении ее основных компонентов (целлюлозы и лигнина). Процесс термического разложения древесины подразделяют на четыре стадии. Начальная стадия связана с сушкой и декарбоксилированием древесины. На второй стадии происходит распад полиоз ($T \sim 265^\circ\text{C}$), сопровождающийся выделением CO , CH_4 и других низкомолекулярных углеводородов, способных воспламеняться. Третья стадия активного распада соответствует максимальной скорости разложения целлюлозы при температуре 310°C . На распад полиоз и целлюлозы накладывается процесс разложения лигнина. Эта стадия завершается при температуре 360°C и характеризуется образованием основного количества летучих продуктов (55% от массы образца). При этом создаются условия для устойчивого пламенного горения. Четвертая стадия — стадия формирования структуры угля — экзотермична (максимум данного эффекта соответствует температуре 480°C) и соответствует фазе беспламенного горения.

Выбор средств огнезащиты деревянных конструкций осуществляется с учетом рассмотренных выше особенностей ее поведения при высокотемпературном нагреве в условиях пожара.

Для конструктивной огнезащиты деревянных строительных конструкций, принцип действия которой заключается в предотвращении их нагрева до температуры начала выхода горючих продуктов термического разложения, пригодны средства, рассмотренные в предыдущих параграфах данной главы. Среди химических способов огнезащиты древесины наибольшее распространение получила пропитка антипиренами.

Способ огнезащиты древесины путем пропитки основан на введении в ее массу антипиренов — соединений, разлагающихся под действием теплоты и подавляющих пламенное горение или тление.

Для огнезащиты древесины применяют следующие способы пропитки: диффузионный (ГОСТ 20022.12—81), панельный (ГОСТ 20022.4—75, с изм.); прогрев — холодная ванна (ГОСТ 20022.6—76, с изм.); вакуум —

давление — вакуум (ГОСТ- 20022.7—82); нанесение на поверхность (ГОСТ 20022.9—76, с изм.), вымачивание.

Приняты следующие условные обозначения способов пропитки: А — диффузионный; Б — нанесение на поверхность; В — вымачивание; Г — панельный; Д — прогрев — холодная ванна; Е - вакуум — давление — вакуум.

Пропитка под давлением (с расходом сухой соли не менее 75 кг на 1 м³ древесины) заключается в обработке древесины в специальных камерах высокорастворимыми антипиренами. Это дает возможность получить тонкие и плотные огнезащитные оболочки на поверхности конструктивных элементов.

Пропитка методом горяче-холодных ванн (с расходом сухой соли не менее 50 кг на 1 м³ древесины) состоит в попеременной обработке древесины горячими и холодными растворами антипиренов. При нахождении древесины в горячем растворе происходит удаление из ее пор воздуха и водяных паров. При последующем охлаждении в порах древесины образуется разрежение, что позволяет проникать в них огнезащитному раствору.

Диффузионная пропитка предусматривает обработку древесины антипиренами в условиях последовательного изменения давления в автоклаве. Разработано несколько режимов диффузионной пропитки древесины.

Поверхностная пропитка с повышенным расходом соли (не менее 100 г на 1 м² обрабатываемой поверхности древесины) состоит в многократном нанесении раствора антипирена на поверхность деревянных элементов конструкций ручным или механизированным способом.

Пропитка под давлением сопряжена с трудностями, вызываемыми большими габаритами и сложной формой элементов, а так же сопротивлением клеевых швов и других крепежных средств прониканию в древесину пропиточных растворов. Кроме того, для выполнения

технологических операций пропитки древесины в этом случае требуется дорогостоящее оборудование. Имеющееся оборудование позволяет пропитывать лишь отдельные элементы малогабаритных конструкций, а оборудование для пропитки большепролетных конструкций практически отсутствует. Кроме того, из-за большого поглощения антипиренов под давлением происходит изменение свойств древесины (ухудшается эластичность, прочность клеевого шва), поэтому предпочтительнее поверхностная пропитка, обуславливающая огнезащиту древесины за счет модификации поверхностного слоя.

Защитные пропитки бывают водо- и органорастворимые. К первым относятся соли аммония и фосфорной кислоты, соединения бора, хрома, меди, мышьяка, цинка, пентахлорфенолят натрия сочетания с боратами, хроматами, фосфоросодержащими и другими соединениями; ко вторым — каменноугольное, антраценовое, сланцевое масла, отходы нефтяного сырья в сочетании с органическими растворителями. Гидрофобные добавки (парафин, канифоль и др.) вместе с растворителем, заполняя капиллярнососудистую систему древесины, создают механический барьер и препятствуют проникновению влаги. В качестве растворителей применяют диоксан, ксилол, дихлорбензол, лигроин, хлороформ и др. Химическое взаимодействие этих пропиток с компонентами древесины повышает их стойкость к эксплуатационным воздействиям и действию огня.

С точки зрения перевода древесины в группу трудносгораемых материалов наиболее эффективен метод пропитки под давлением (табл. 23). Огневые испытания пропитанной антипиренами под давлением древесины в «шахтной печи» показали, что такая древесина обладает свойствами трудносгораемого материала. Однако скорость обугливания древесины, обработанной антипиренами, на 5 — 10% выше, чем необработанной. Защитные пропитки позволяют классифицировать древесину как трудносгораемую только при достаточно большом поглощении антипирена (66-81 кг/м³). Пропитка антипиренами древесных пластиков также

увеличивает их сопротивление действию огня. Например, огневые испытания образцов необработанной фанеры в «огневой трубе» дают потерю массы до 80 — 90%, тогда как для пропитанной фанеры этот показатель уменьшается до 8%.

Из отечественных антипиренов наиболее широко известен водорастворимый неорганический антипирен 13, или МС 1 : 1, представляющий собой смесь гидрофосфата аммония и сульфита аммония в соотношении по массе 1 : 1. В состав входит также фторид натрия, защищающий древесину от гниения. При пропитке древесины 12%-ным раствором полное поглощение составляет: сухих солей — 60 — 70 кг/м³; рабочего раствора — примерно 550л. Прочность древесины сосны в результате огнезащитной обработки снижается незначительно, за исключением сопротивления ударному изгибу, снижающемуся на 20 — 40%. Древесина светлых пород, пропитанная антипиреном 13, после сушки слегка темнеет, а древесина дуба чернеет, приобретая цвет мореного дуба. Огнезащищенная древесина допускает сушку, окраску, склеивание и лакировку.

Американская ассоциация производителей антипиренов рекомендует для пропитки пиломатериалов и изделий из цельной древесины четыре типа препаратов общего назначения, обеспечивающих минимальную стоимость обработки (табл. 24).

На рис. 2.12 графически представлены результаты испытания в «большой» огневой трубе образцов, содержащих различные антипирены при их переменной массовой доле в древесине. Критерияльная потеря массы не более 20% (контрольные образцы сгорают на 85%) при испытании образцов достигается при поглощении солей не менее 80 кг/м³, что требуется для категории трудносгораемых материалов. Для получения трудновоспламеняющихся материалов поглощение антипиренов должно быть уменьшено примерно в 2 раза. Перенасыщение древесины антипиренами, когда массовая доля их превышает 80 кг/м³, оказывается малоэффективным.

Кислородный индекс (КИ) образцов древесины, как и потеря массы, зависит от вида антипирена. При уровне обработки, когда массовая доля составляла 80 кг/м^3 , получены следующие значения для древесины с $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ кислотный индекс составил 36, для $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ — 38, для $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ — 33 (для непропитанной древесины КИ = 20). Однако для условий последующего тления значения КИ могут несколько изменяться.

Таблица 23 и таблица 24

**Основные препараты для огнезащитной обработки древесины
методом пропитки под давлением**

Марка препарата	Вымываемость ¹ препарата	Пропиточный коэффициент	Рекомендуемый способ пропитки	Общее поглоще- ние препарата, кг/м^3
ПТАС	НВ	1,6	А — Е	85
МС 3 : 7	ЛВ	—	Г	66
МС 1 : 1	ЛВ	—	Г, Е	66
ПББ-255	ТВ	0,2	Г, Е	76
ПБС-255	ТВ	0,4	Г, Е	81
ХМББ-3324	ТВ	1,0	Г, Е	79
ХМХА-1110	ТВ	1,2	Г, Е	75
ДМФ-552	ЛВ	0,6	Г, Е	76
ФБС-255	ЛВ	0,6	Г, Е	81
ГМФ-552	ЛВ	0,7	Г, Е	80
¹ Условное обозначение вымываемости препарата: ЛВ — легковымываемый; ТВ — трудновымываемый; НВ — невымываемый.				

Рецептура препаратов, рекомендуемых Американской ассоциацией производителей антипиренов для пропитки древесины

Компонент	Содержание компонентов, % по массе, по типам препаратов			
	I	II	III	IV
Хлорид цинка	81,5	65,2	—	35,0
Борная кислота	—	10,0	20,0	25,0
Тетраборат натрия	—	—	10,0	—
Сульфат аммония	—	10,0	60,0	35,0
Гидрофосфат аммония	—	—	10,8	—
Нихромат натрия	18,5	14,8	—	5,0

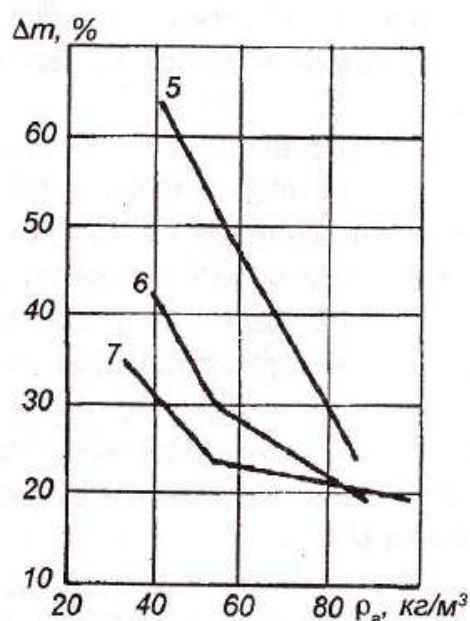
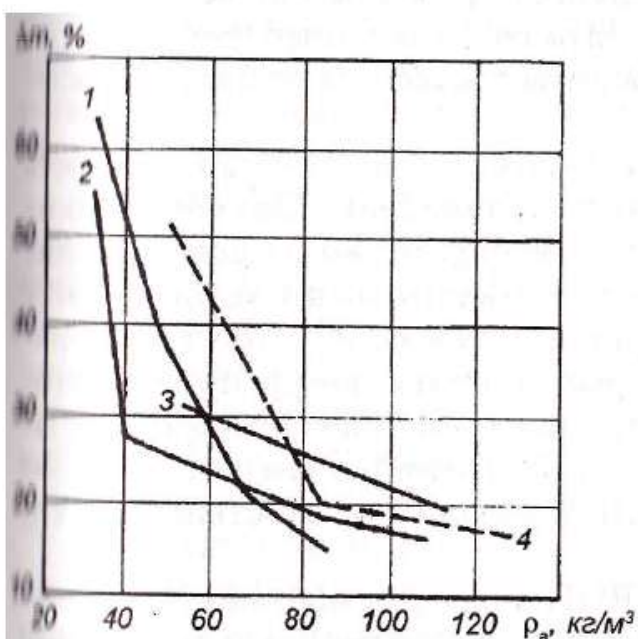
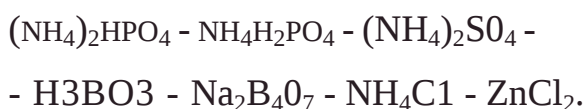


Рис. 2.12. Потеря массы образцов Δm при испытании в зависимости от уровня обработки антипиренами ρ_a (для наглядности кривые разделены на две группы):

1 — $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$; 2 — $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$; 3 — $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; 4 — ZnCl_2 ; 5 — H_3BO_3 ; 6 — $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot \text{H}_3\text{BO}_3 (60:40)$; 7 — $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$

Тетраборат натрия более эффективен в сочетании с борной кислотой, последняя особенно необходима для ингибирования тления. Сочетание сульфата аммония с фосфатами диктуется соображениями снижения стоимости препарата за счет более дешевого сульфата. Отдельные антипирены в порядке уменьшения огнезащитной способности относительно древесины могут быть расположены в следующий ряд:



Компоненты препаратов комбинируют с целью получения оптимальных огнезащитных свойств с учетом требований к техникоэксплуатационным характеристикам огнезащитных древесных материалов: прочности, обрабатываемости, коррозионной агрессивности, гигроскопичности, способности склеиваться и окрашиваться. Учитывают также условия эксплуатации материалов: возможность прямого воздействия воды, контакта с агрессивной средой, наличие биоразрушителей и др.

Под эффективностью антипиренов понимают не только уровень их огнезащитной способности, но и необходимые для использования технологические и эксплуатационные свойства, а также соответствующие экономические показатели антипиренов и технологии их применения. Устойчивые огнезащитные группировки (сочетания) и подходящие для конкретных целей составы выбирают как функцию желательности ряда показателей. При построении многокомпонентных огнезащитных препаратов учитывают также и необходимость защиты древесины от биоповреждений.

Применение *биоогнезащитных средств* открывает возможность комплексной защиты древесных материалов. Создание таких средств базируется на рецептурной форме, когда соотношение компонентов можно варьировать применительно к условиям эксплуатации деревянных конструкций или к конкретному местонахождению конструкций (перекрытия, стены, внутренние перегородки и др.). Препараты

комплексного действия содержат огнезащитную (один или несколько компонентов) и антисептическую части. Последняя может угнетать огнезащитное действие либо его усиливать.

В Сенежской лаборатории ВНИИДрев разработано и развивается новое направление в построении биоогнезащитных препаратов, заключающееся в специальном подборе компонентов направленного взаимодополняющего действия. Разработан и гостирован ряд препаратов рецептурной формы. Препарат ПББ состоит из тетрабората натрия и борной кислоты (огнезащитная часть). Образует двухслойную защитную оболочку: в глубинной зоне сосредоточены соединения бора, а в предповерхностной зоне — пентахлорфенолят натрия. Из-за пентахлорфенолята натрия ПББ не рекомендуют применять внутри помещения. Близок к ПББ по своему составу препарат ПБС.

Препарат ХМББ состоит из дихромата натрия или калия, медного купороса (техническое название сульфата меди $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), буры (тетрабората натрия) и борной кислоты в соотношении по массе 1 : 1: 2 : 8. Это соотношение в целях усиления биозащитного действия в зависимости от условий эксплуатации изменяют с увеличением доли первых двух компонентов. Препарат образует в древесине двухслойную оболочку с преобладанием в пред поверхностной зоне соединений хрома и бора, в средней зоне — меди и бора, и глубинной — бора.

Препарат ХМХА содержит дихромат натрия или калия, сульфат меди и хлорид аммония. Хорошо растворим в воде, но трудновыводим из-за образования в древесине новых соединений. Несколько снижает динамическую прочность древесины, корродирует черные металлы.

На принципе выбора устойчивых огнезащитных группировок и взаимодополняющих сочетаний получены новые препараты рецептурной формы с высокой проникающей способностью, низкой корродирующей агрессивностью, устойчивые в условиях низкой и высокой переменной влажности воздуха. Их назначение — биоогнезащита древесины различных

сортаментов путем глубокой (глубинной) пропитки в автоклавах или в ваннах. Эти препараты используют также для обработки деревянных сооружений панельным способом без разборки.

Таблица 25

Биоогнезащитные препараты для деревянных конструкций

Марка препарата	Состав препарата и доля компонентов, % по массе	Токсичность, кг/м ³	Огнезащитный способ, кг/м ³	Растворимость при 20 °С, %	Пропиточный коэффициент	Коэффициент коррозии, мм/год	Изменение прочности, %	
							при сжатии	при изгибе
ТМФ-552	Триполифосфат натрия — 41, карбамид — 42, фторид натрия — 17	1,5	53	15	0,3	0,04	–1	0
ПМФ-552	Полифосфат аммония — 41, карбамид — 42, фторид натрия — 17	4,7	32	8	0,8	0,04	—	—
ФБС-225	Фторид натрия — 17, борная кислота — 41, карбонат натрия — 42	0,8	31	10	0,6	0,04	+35	+13
ДМФ-552	Диаммонийфосфат — 41, карбамид — 42, фторид натрия — 17	0,8	52	20	0,7	0,16	+11	–9
БС-13	Борная кислота — 25, карбонат натрия — 25	5,2	28	10	0,9	0,01	+62	+3
ХМХА-1110	Дихромат натрия или калия — 8, сульфат меди — 8, хлорид аммония — 84	18,2	31	30	1,0	0,40	+4	–6
ПББ-255	Пентахлорфенолят натрия — 17, борная кислота — 41, бура — 42	0,3	34	10	0,3	0,04	+31	+23
ПБС-255	Пентахлорфенолят натрия — 17, борная кислота — 41, карбонат натрия — 42	1,6	37	10	0,4	0,06	+30	+18
ПТАС	Пентахлорфенол — 5, трихлорэтилфосфат — 10...20, ацетон — 33...45, уайт-спирит — 32...45	0,6	35	—	1,6	0,04	–2	+1

Характеристика препаратов для деревянных конструкций приведена в табл.25. Биозащитная активность оценена токсичностью препаратов по величине порогового поглощения, а огнезащитная способность — по минимальному поглощению, обеспечивающему защиту по первому классу (по методу ОСП). Пропиточный коэффициент указан по отношению к дистиллированной воде. Коэффициент коррозии и изменение прочности древесины оценены при поглощении препаратов 40 кг/м³.

В Институте химии древесины (г. Рига) был разработан водорастворимый препарат МБ-1. В его основе лежит устойчивая огнезащитная группировка ББ: бура (тетраборат натрия) — борная кислота. Сульфат меди обеспечивает биозащиту. Карбонат аммония выступает как огнезащитный компонент, термическое разложение которого происходит с образованием аммиака и диоксида углерода, ингибирующих пламенное горение в газовой фазе. Соотношение компонентов МБ-1 по массе следующее, %: сульфат меди — 10,9; карбонат аммония — 14,1; тетраборат натрия — 21,5; борная кислота — 53,5. Рецептурой в зависимости от назначения можно несколько варьировать. Сульфат меди и карбонат аммония в растворе образуют медно-аммиачный комплекс, чем предотвращается после введения тетрабората натрия образование бората меди, выпадающего в осадок. Борная кислота способствует растворению тетрабората натрия. Массовая доля сухих веществ в рабочем растворе 17 %, рН 8,2.

Особую группу антипиренов составляют огнезащитные препараты переменной кислотности, предназначенные для материалов, изготавливаемых горячим прессованием: ДВП, ДСтП, ДБСП и др. Их разработка была вызвана ограничениями, накладываемыми на использование известных препаратов для защиты древесины в связи с высокими температурами прессования и последующей термообработки.

Первым препаратом, удовлетворяющим требованиям плитного производства, явился огнезащитный состав ФМД, допускающий прессование при температуре 190—200 °С ДВП из древесных волокон, обработанных

ФМД, и последующую их продолжительную термообработку без снижения прочности готовой продукции. Состав ФМД синтезируют из компонентов в водном растворе. Принципиально новым явился метод синтеза препаратов в расплаве с последующим растворением продукта. Таким образом синтезируют антипирен КМ.

Огнезащитный состав ФМД [68]. Базовая рецептура содержит фосфорную кислоту H_3PO_4 , карбамид (мочевину) NH_2CONH_2 и дицианамид $C_2H_4N_4$ при мольном соотношении компонентов 1: 3 : 1,5. Область активации состава характеризуется ярко выраженным экзотермическим пиком при температуре 210 °С и сопровождается повышением кислотности.

Антипирен КМ представляет собой огнезащитный препарат готовой формы, являющийся продуктом конденсации фосфорной кислоты и карбамида в расплаве. Основное вещество — амидофосфат нестроогого стехиометрического соотношения. В зависимости от назначения синтезируют три марки КМ: кислый продукт, слабокислый и нейтральный. Для защиты целлюлозных и древесных материалов на синтетических смолах (например, ДВСП, КВВ) разработана модификация КМ с добавкой галогенидов.

Синтез КМ происходит в расплаве компонентов, благодаря чему значительно снижается возможность гидролиза исходного карбамида и образующего продукта при высокой температуре. Это позволяет снизить массовую долю органического вещества, обладающего основными свойствами, и заменить более термостойкий менее растворимый дицианамид на более доступный и дешевый карбамид.

Антипирен КМ имеет три максимума скорости терморазложения: 175, 210 и 390 °С. Разложение в интервале температур 190-300 °С (область интенсивного термического превращения древесинного вещества) проходит эндотермически, что положительно сказывается на снижении горючести древесных материалов.

Элементный состав основной фракции слабокислого продукта КМ, выделенной путем перекристаллизации, следующий, %: С-8,7; Н - 6,6; Р - 17,1; N - 26,9; О - 40,7 [68]. Глубина конденсации влияет на элементный состав и свойства продукта КМ.

Кроме пропиточных составов для огнезащиты деревянных конструкций применяют разнообразные неvspучивающиеся и вспучивающиеся огнезащитные краски, которые выполняют следующие функции: защищают сгораемый материал от воспламенения; при нагревании выделяют газы, препятствующие процессу горения и поглощающие выделяющуюся теплоту, выделяют также воду, поддерживая температуру на уровне 100 °С.

Неvspучивающиеся краски чаще всего состоят из хлорированных алкидов, гидрооксида алюминия или смеси хлорированных парафинов и оксида сурьмы. Они задерживают распространение пламени на поверхности древесины в результате присутствия в их составе таких элементов, как фосфор, азот, хлор, или быстроулетучивающихся веществ, препятствующих процессу горения.

Особое место занимают *vspучивающиеся краски*, защитные свойства которых проявляются при действии огня. Вспучивающийся слой состоит из углерод содержащего вещества, дегидратирующего вещества, являющегося катализатором вспенивания состава, веществ, способствующих вспениванию, и др. При вспучивании состава происходит постепенное выделение газов, препятствующих развитию процесса горения. В состав вспучивающихся красок входят фосфат аммония, вермикулит, казеин, крахмал, мочеви́на, фосфорная кислота, параформальдегид, полиамид, масло изано и др

Краску ОФП-9 (ГОСТ 23790—79) применяют для огнезащиты деревянных конструкций, эксплуатируемых внутри помещения с относительной влажностью воздуха не более 75 %. В случае применения краски в условиях более высокой влажности ее поверхность гидроизолируют нанесением двух-трех слоев влагостойкой краски. Общая толщина нанесенного слоя 0,6 мм. Такая толщина является оптимальной с точки

зрения эффективности используемого огнезащитного состава (рис. 2.13). Плотность сухого состава в уплотненном состоянии 110 — 115 кг/м³. Расход сухой смеси краски с учетом производственных потерь составляет 500 — 700 г/м². Состав состоит из наполнителя, фосфатного связующего, антипирена и пигмента. В качестве связующего применяют полиметафосфат натрия. Антипиреном служит гидроксид алюминия, а пигментом - сурик или оксид цинка.

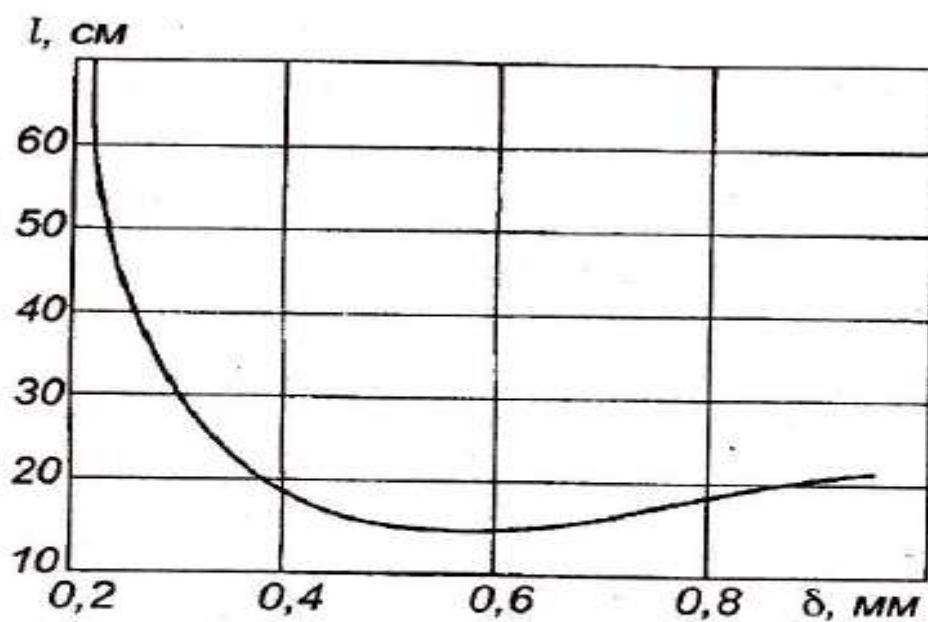


Рис. 2.13. Зависимость распространения пламени l по поверхности образца фанеры от толщины слоя δ вспучивающейся краски ОФП-9

Применение краски ОФП-9 позволяет перевести древесину и материалы на ее основе в группу трудносгораемых материалов. Средняя потеря массы образцов древесины, обработанных составом ОФП-9, после огневого испытания по методу «керамической трубы» составляет 4,4 — 6,2 %. Задержка воспламенения древесины равняется 5 — 6 мин (применение невспучивающихся красок замедляет воспламенение древесины только на 3 — 5 мин). Краску ОФП-9 применяют и для огнезащиты древесных пластиков.

Краску ВПД (ГОСТ 25190—82) применяют для огнезащиты деревянных конструкций при влажности воздуха не более 80%, Отсутствии выделения агрессивных паров и газов и положительной температуре не выше 35 °С. При эксплуатации в условиях повышенной влажности используют комплексный состав: противокоррозионный грунт — вспучивающаяся краска — влагозащитный лакокрасочный материал, выполняющий одновременно роль декоративной отделки. Краска ВПД отличается от описанного в параграфе 2.6 состава ВПМ-2 только отсутствием асбеста. Огневые испытания клееных деревянных балок, покрытых краской ВПД, показали, что температура воспламенения 250 °С на поверхности балок достигается через 10 мин после начала огневого воздействия по стандартному огневому режиму. Краска защищает деревянную поверхность от распространения огня.

К вспучивающимся краскам также относятся составы «Экран-Д», ПХВО, «Пиролан 64» и др. Состав «Экран-Д» представляет собой смесь термостойких газообразующих наполнителей в водном растворе мочевиноформальдегидной смолы и жидкого стекла. Состав изготавливают в заводских условиях и выпускают в двух частях — А и Б. Обе части перемешивают до получения однородной массы. Расход сырого состава равняется 1,2 — 1,5 кг на один слой покрытия, число слоев — не менее трех, общая толщина покрытия 3 — 3,5 мм. Краску ПХВО изготавливают на основе перхлорвинилового полимера. Состав «Пиролан 64» представляет собой порошкообразную смесь, включающую мочевиноформальдегидную смолу, газообразующие добавки (моноаммоний-фосфат и др.), наполнитель и смачиватель.

Несмотря на эффективность вспучивающихся красок, их применение ограничивается влажностью воздуха, которая должна быть не более 60%.

Окрашенная вспучивающимися красками древесина нуждается в дополнительном применении декоративных материалов.

КОМПОЗИЦИОННАЯ (КОМБИНИРОВАННАЯ) ОГНЕЗАЩИТА

В сводной табл. 26 перечислены средства огнезащиты, наиболее широко применяемые на практике в настоящее время. Основные преимущества и недостатки способов огнезащиты, которыми реализуются эти средства, приведены в табл. 27. Анализ данных этих таблиц показывает, что каждое из указанных средств в отдельности не позволяет удовлетворить в полной мере всей совокупности требований, предъявляемых к огнезащите. Проведенные нами исследования показали, что добиться действительно оптимальных решений по огнезащите строительных конструкций во многих случаях (особенно при высоких уровнях требуемого повышения их огнестойкости) принципиально возможно только путем использования композиционной (комбинированной) огнезащиты.

Таблица 26 и Таблица 27

Средства огнезащиты строительных конструкций

Средства огнезащиты	Краткая характеристика	Техническая документация на средство огнезащиты	Изготовитель (поставщик)
Цементно-песчаная штукатурка	Используется цемент марки не ниже М400. Наносится методом набрызга. Применяется армирование стальной сеткой. Плотность 1800 кг/м ³	СН 290-74	Приготавливается на месте проведения работ
Перлитово-вермикулитовая штукатурка	В составы на основе цемента, гипса или жидкого стекла вводятся наполнители из перлита или вермикулита, а также добавки минеральной ваты и асбеста. Плотность 300—400 кг/м ³	Компоненты по ГОСТ: 10178—85, 125—75, 13078—80, 10832—83, 4640—84, 12871—67	Приготавливается на месте из сухих смесей с добавками, вводимыми при затворении смеси
Листы гипсокартонные облегченные (ГКО)	Огнезащитная облицовка конструкции состоит из металлического каркаса, обшивки из листов ГКО и анкеров, фиксирующих планок и уголков, нащельников и других соединительных деталей	ГОСТ 6266—89, ТУ 5742-005-04001508-95	Объединение «Стройпластмасса» и «Мосметаллоконструкция»; ЗАО «ТИГИ-КНАУФ М», г. Красногорск, Московская обл.
Плиты перлитово-фосфогенные теплоизоляционные	Изготавливаются из вспученного перлитового песка, жидкого стекла и гидрофобизирующих добавок. Размеры до 1000×500 мм, толщины 60 и 80 мм. Плотность 250—300 кг/м ³	ТУ 480-1-15-78	Мытищинский комбинат «Стройперлит», г. Мытищи, Московская обл.
Плиты вермикулитовые ПВТН	Изготавливаются на основе жидкого стекла и вспученного вермикулита. Размеры до 1200×600 мм, толщина от 25 до 50 мм. Плотность 600 кг/м ³	ТУ 5767-002-23110955-94	ОАО «Киреевская слюдяная фабрика», г. Киреевск, Тульская обл.; ЗАО «ЭТНА», г. Москва
Плиты базальтоволокнистые ПНТБ	Изготавливаются из холстов супертонкого базальтового волокна и глинистого связующего с добавкой гидрофобизатора. Термостойкость не менее 1150°С. Размеры до 1200×1200 мм, толщина от 30 до 60 мм. Плотность 140 кг/м ³	ТУ 576940-024-5042022414-96	Комбинат «Победа», г. Ирпень, Киевская обл., Украина; АОЗТ «Теплоогнезащита», г. Сергиев Посад, Московская обл.

Средства огнезащиты	Краткая характеристика	Техническая документация на средство огнезащиты	Изготовитель (поставщик)
Плиты минераловатные марки М-75, М-125	Изготавливаются из минеральных волокон на синтетическом связующем. Размеры М-75: 1000×500×90 мм; М-125: 1000×500×(70...50 мм). Плотность М-75 — 75 кг/м ³ , М-125 — 125 кг/м ³	ГОСТ 95573—82	АООТ «Мосасботермостекло», г. Железнодорожный, Московская обл.
Плиты жесткие теплоизоляционные муллитокремнеземистые ШВП-350	Изготавливаются из муллитокремнеземистой ваты на глиняной связке. Термостойкость до 1200°С. Размеры 490×490×100 мм. Плотность 200 кг/м ³	ТУ 36-2345-80	Апрелевский завод теплоизоляционных изделий, Московская обл.
Войлок муллитокремнеземистый МКРВ-200	Изготавливается в виде полотна шириной 700 мм, длиной до 10 м, толщиной 20 мм. Термостойкость до 1200°С. Плотность 200 кг/м ³	ГОСТ 23619—79	Апрелевский завод теплоизоляционных изделий, Московская обл.
Плиты ВЕРМИКУЛЮКС	Изготавливаются на основе силиката кальция толщиной от 20 до 60 мм. Допускают резку и механическую обработку аналогично деревянным элементам. Возможно соединение плит в шпунт без применения лент и накладок, а также при помощи винтов. Размеры: ширина — 600/610, 1200/1220/1250; длина — 2440/2500, 3000/3050	—	CAPE BOARDS Ltd, Великобритания
Плиты базальтоволочнистые CONLIT 150	Изготавливаются из базальтового волокна и органического связующего с добавкой гидрофобизатора. Термостойкость не менее 1100°С. Размеры до 2000×1200 мм, толщина от 25 до 60 мм. Плотность 150 кг/м ³	—	ROCKWOOL, Дания ОО «Герметстрой» АОЗТ «Максмир», г. Москва
Плиты базальтоволочнистые PAL	Изготавливаются из базальтового волокна и органического связующего с добавкой гидрофобизатора. Термостойкость не менее 1000°С. Размеры до 1200×600 мм, толщина от 20 до 100 мм. Плотность 140 кг/м ³	—	Рагос, Финляндия Партек Экомакс, г. Москва

Средства огнезащиты	Краткая характеристика	Техническая документация на средство огнезащиты	Изготовитель (поставщик)
Фосфатное покрытие ФФП-10	В состав входит: силикофосфатное связующее, мергель, вермикулит, волокнистый наполнитель, вода. Наносится механизированным способом	ГОСТ 25665—83	Приготавливается на месте проведения работ смешением компонентов
Состав ФФВ-180	В состав входит: гипсоцементное пуццолановое вяжущее, волокно МКРР-130, пластификатор ПВД на основе латекса СКС-65-ГП, шлам флотации фосфоритных руд. Наносится механизированным способом	ВСН-113-84	Приготавливается на месте проведения работ смешением компонентов
Фосфатное покрытие ФФП-МВ	В состав входит: жидкое стекло, гранулированная минеральная вата и нефелиновый антипирен. Наносится механизированным способом. Плотность 300 кг/м ³	ГОСТ 25665—83	Ассоциация «Крилак», г. Москва
Покрытие ФФПМ-12	Состав на основе жидкого стекла с минеральным наполнителем. Наносится механизированным способом. Плотность 950 кг/м ³	ТУ 5767-002-23110955-94	АОЗТ «Слюдяная фабрика», г. Колпино, Ленинградская обл.; ТОО «Терминерал», г. Санкт-Петербург
Состав «ЭСМА»	В состав входит: жидкое стекло натриевого, силикофосфатное связующее, отходы слюды производства электроизоляционных материалов, феррованадиевый шлам, вода. Наносится механизированным способом. Плотность 800 кг/м ³	ТУ ОЯД 503.091-94	ТОО «Эсма», пос. Атапцево, Наро-Фоминский р-н, Московская обл.
Состав «Пенокс»	Вспененный состав на основе жидкого стекла с добавками минеральных наполнителей. Наносится напылением, возможна заливка в опалубку. Плотность 350—450 кг/м ³	ТУ 5775-013-17297211-95	ТОО «Научно-производственная лаборатория 38080», г. Москва
Состав «Антигор»	Вспучивающаяся композиция на основе жидкого стекла и минерального наполнителя. Наносится шпателем	ТУ 7719-164-00000335-96	АОЗТ НПП «Спецэнерготехника», г. Москва

Средства огнезащиты	Краткая характеристика	Техническая документация на средство огнезащиты	Изготовитель (поставщик)
Покр ы т и е «Файрекс-400»	Состав на основе жидкого стекла и минерального наполнителя, представляющий собой густотертую пасту светло-серого цвета. Наносится кистью и распылителем	ТУ 57-52-004-95	Ассоциация «Крилак», г. Москва
Покр ы т и е ОЗП-1	Огнезащитная система, состоящая из грунта ВВМ-10ФМ (ТУ 6-48-05785904-95), вспучивающегося состава на жидком стекле ОСП-1 (ТУ 2145-001-40606310-98) и покрывного материала ВВМ-7ФБС (ТУ 6-48-05785904-95). Наносится кистью и распылителем	ТУ 2145-002-40606310-98	ЗАО «Омита», г. Королев, Московская обл.
Состав ОЗС-МВ	Состав на основе минеральных наполнителей, обладающих способностью к расширению при нагреве, и силикофосфатного связующего. Наносится кистью и распылителем	ТУ 5775-008-17297211-97	ТОО «Научно-производственная лаборатория 38080», г. Москва
Покр ы т и е МПВО	Однокомпонентный вспучивающийся состав на основе хлорсульфированного полиэтилена, каучука и терморасширяющегося графита. Растворитель — сольвент. Обладает высокой влагостойкостью и долговечностью. Наносится кистью	ТУ 5775-007-17297211-97	ТОО «Научно-производственная лаборатория 38080», г. Москва
Состав SIG-NULAN 3000	Состав на основе портландцемента, минеральных наполнителей и технологических добавок. Наносится методом полусухого торкретирования с помощью высокопроизводительных машин. Плотность около 350 кг/м ³	—	SIGNUM Brandschutz-M GmbH, Германия
С о с т а в Fendolite M-II	Состав на основе портландцемента и вспученного вермикулита. Наносится методом полусухого торкретирования с помощью высокопроизводительных машин. Плотность 320 — 720 кг/м ³	—	Mandoval Coatings Ltd., Великобритания

Средства огнезащиты	Краткая характеристика	Техническая документация на средство огнезащиты	Изготовитель (поставщик)
Вспучивающаяся краска НПМ-2	В состав входит: смола ММФ-50/50%, Na-соль карбоксиметилцеллюлозы, аммофос марки А, мелем, дициандиамид, асбест марки К-6, стекловолокно рубленое. Для приготовления рабочего состава паста заводского изготовления смешивается с аммофосом в соотношении 7,4:2,6	ГОСТ 25665—83	ТОО «Загорский лакокрасочный завод», г. Сергиев Посад, Московская обл.
Покр ы т и е СГК-1	Двухкомпонентный вспучивающийся состав на основе хлорсульфированного полиэтилена и терморасширяющегося графита. Растворитель — толуол. Обладает высокой влагостойкостью, адгезией и долговечностью. Наносится кистью и распылителем	ТУ 7719-162-00000335-95	АОЗТ НПП «Спецэнерготехника», г. Москва
Покр ы т и е «Эндотерм КТ-150»	Двухкомпонентный вспучивающийся состав на основе хлорсульфированного полиэтилена, терморасширяющегося графита и базальтового волокна. Растворитель — толуол. Обладает высокой влагостойкостью, адгезией и долговечностью. Наносится кистью и распылителем	ТУ 13481691.01-97	НПП «Спецматериалы», г. Донецк, Украина
Покр ы т и е «Хенсотерм АКС»	Водоземulsionная система органических и неорганических компонентов. Применяется с грунтом (типа ГФ-021), может применяться с наружным защитно-красящим слоем. Наносится распылителем, кистью, валиком	—	Hensotherm AB, Швеция; АО «Глобинвест», Москва
Покр ы т и е «N-607	Водоземulsionная система органических и неорганических компонентов. Применяется с грунтом (типа ГФ-021), может применяться с наружным защитно-красящим слоем. Наносится распылителем, кистью, валиком	—	Nullifire Ltd. Великобритания; АО «Осоран», г. Таллинн, Эстония

Средства огнезащиты	Краткая характеристика	Техническая документация на средство огнезащиты	Изготовитель (поставщик)
Покрытие «Барриер 87»	Водоэмульсионная система органических и неорганических компонентов (выпускается также на растворителе сольвент). Применяется с грунтом (типа ГФ-021), может применяться с наружным защитно-красящим слоем. Наносится распылителем, кистью, валиком	—	IMPA s.p.a., Италия; ООО «Истрокон М»
Покрытие «Fireflex»	Водоэмульсионная система органических и неорганических компонентов. Применяется с грунтом (типа ГФ-021), может применяться с наружным защитно-красящим слоем. Наносится распылителем, кистью, валиком	—	Tikurila Coating OY, Финляндия; Ассоциация «Кри- лак», Компания «Фин- краска», г. Москва
Покрытие «Puro-Tech S.P.»	Водоэмульсионная система органических и неорганических компонентов. Применяется с грунтом (типа ГФ-021), может применяться с наружным защитно-красящим слоем. Наносится распылителем, кистью, валиком	—	E. WOOD. Ltd , Ве- ликобритания; AD REM Ltd., г. Ри- га, Латвия

**Преимущества и недостатки применяемых способов
огнезащиты строительных конструкций**

Способ	Преимущества	Недостатки
Обетонирование, оштукатуривание, облицовка кирпичом	Относительно низкая стоимость материалов	Большая масса (дополнительная нагрузка на фундамент). Необходимость применения стальной сетки и (или) анкеров. Большая трудоемкость работ. Сложность восстановления и ремонта
Установка облицовок или экранов из плитных или листовых материалов	Повышенная вибростойкость и долговечность за счет механического крепления к конструкциям. Возможность демонтажа и ремонтпригодность. Высокая производительность работ по установке огнезащиты. Хорошие защитно-декоративные качества	Большой уровень требуемых толщин огнезащиты (в случае волокнистых материалов). Высокий уровень паропроницаемости. Перерасход материала при низком уровне требуемых пределов огнестойкости защищаемых конструкций
Нанесение методами набрызга или полусухого торкретирования составов на минеральном вяжущем	Относительно низкая трудоемкость. Возможность эксплуатации в атмосферных условиях (для составов на основе портландцемента)	Низкая вибростойкость и недолговечность покрытия при больших толщинах слоев. Большая продолжительность нанесения и невозможность параллельного проведения других работ. Сложность восстановления и ремонта. Трудность обеспечения и контроля заданных толщин покрытия
Нанесение напылением вспучивающихся покрытий	Относительно низкая трудоемкость. Малая толщина покрытия	Низкий уровень достигаемых пределов огнестойкости (до 30—45 мин). Трудность обеспечения и контроля заданных толщин

Композиционная огнезащита представляет собой оптимальное сочетание слоев из наиболее эффективных плитных материалов с разлагающимися и (или) вспучивающимися покрытиями, плитных или листовых материалов с волокнистой или пористой теплоизоляцией и т.д. В состав композиционной огнезащиты в определенных случаях целесообразно

вводить стальные прослойки, выполняющие, наряду с чисто конструкционной функцией, роль экранов для защиты от теплового излучения. Принцип композиционной огнезащиты иллюстрируется схемами, представленными на рис 2.14.

Разумеется, в каждом конкретном случае структура и состав композиционной огнезащиты могут отличаться от рассмотренных на схемах рис. 2.14, тем более, что для выбора оптимальных сочетаний различных огнезащитных средств в настоящее время имеются большие возможности благодаря наличию широкой номенклатуры выпускаемых как отечественной, так и зарубежной промышленностью составов и материалов (см. табл. 2.26). *Выбором для каждого конкретного объекта оптимальной структуры композиционной огнезащиты и соотношения ее слоев удастся удовлетворить предъявляемые к ней сложные и противоречивые требования во всей их совокупности.*

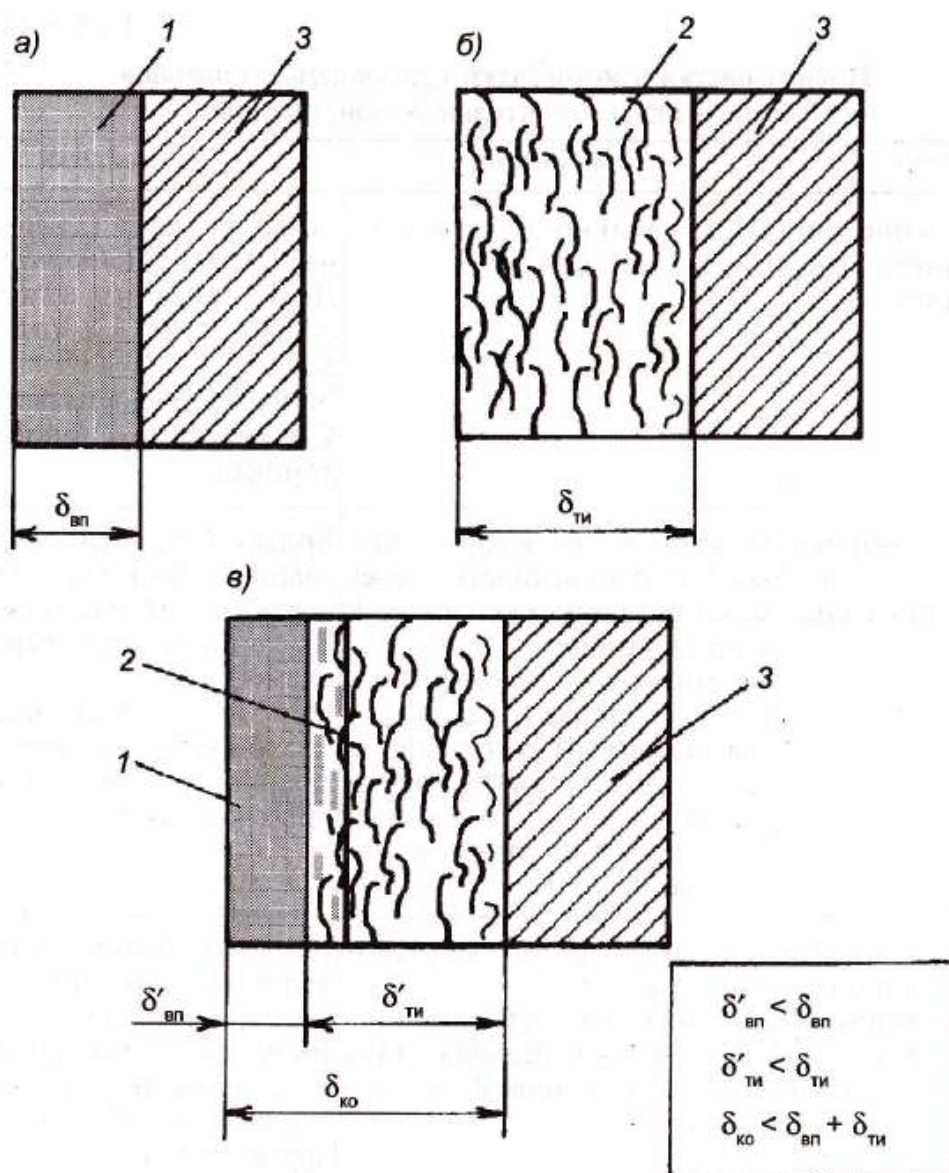


Рис. 2.14. Традиционные способы огнезащиты разлагающимся или вспучивающимся покрытием (а), термостойкой теплоизоляцией (б), одним из возможных вариантов композиционной огнезащиты (в):

1 — разлагающееся или вспучивающееся покрытие; **2** — огнезащита с помощью термостойкого теплоизоляционного материала; **3** — защищаемая конструкция; индексы: вп — вспучивающееся покрытие; ти — теплоизоляция; ко — композиционная огнезащита

В качестве примеров рациональных вариантов композиционной огнезащиты можно предложить следующие конструкции:

- 1) сочетание термостойких волокнистых плит с разлагающимися покрытиями на минеральных вяжущих;

- 2) сочетание термостойких волокнистых материалов различной плотности со вспучивающимся покрытием;
- 3) сочетание волокнистых теплоизоляционных материалов с гипсоволокнистыми или гипсокартонными плитами;
- 4) сочетание волокнистых теплоизоляционных материалов с вермикулитовыми плитами;
- 5) сочетание кирпичной кладки с базальтоволокнистыми или минераловатными матами.

Примеры различных вариантов исполнения конструктивной композиционной огнезащиты даны в Приложении. Все эти варианты были реализованы на практике.

Принцип композиционности удачно реализован, например, и конструкции композиционной огнезащиты из термостойких не сгораемых базальтоволокнистых плит ПНТБ (ТУ 576940-024 3042022414-96) и фосфатного покрытия «ЭСМА» (ТУ ОЯД.503.091-94), схема которой показана на рис. 2.15.

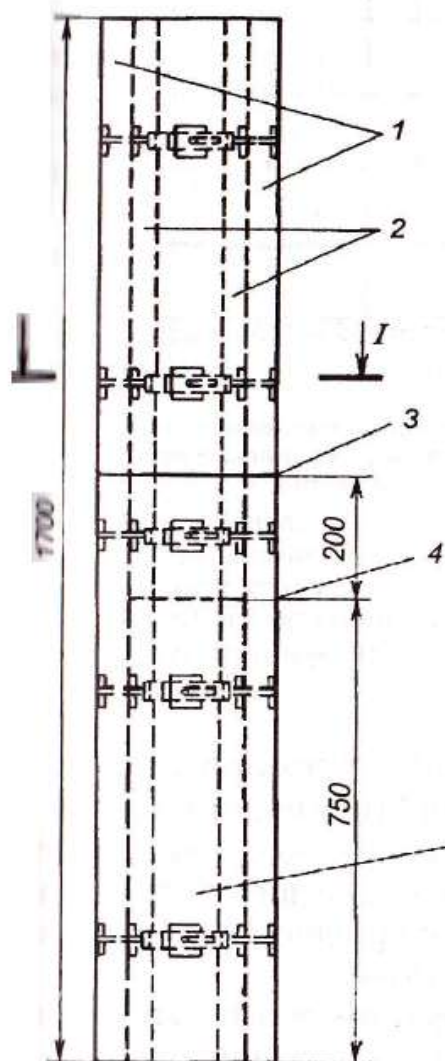
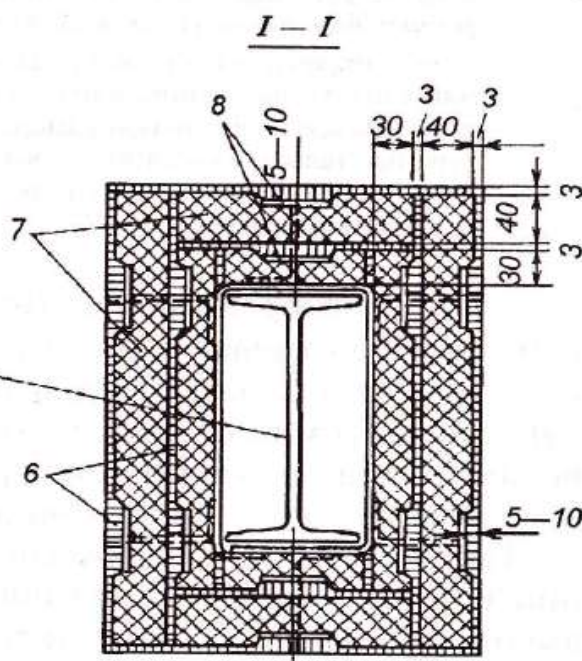


Рис. 2.15. Схема конструкции композиционной огнезащиты из термостойких негорючих базальтоволокнистых плит и фосфатного покрытия «ЭСМА», установленной на образце стальной колонны (двутавр № 20):

1 — слой плит ПНТБ наружный; 2 — то же внутренний; 3 — стык плит ПНТБ наружного слоя; 4 — то же внутреннего слоя; 5 — двутавр № 20; 6 — покрытие «ЭСМА»; 7 — плиты ПНТБ; 8 — шайбы



Огневые испытания опытных образцов стальных колонн с композиционно огнезащитой, изготовленной на основе плит ПНТБ и покрытия «ЭСМА» в соответствии с рис. 2.15, проводились во ВНИИПО МВД РФ согласно ГОСТ 30247.1-94 и НПБ 236-97.

Испытания показали, что в течение 180 мин огневого воздействия по стандартному режиму прогрев стали до критической температуры 500 °С не

был достигнут. Согласно п. 6.5.3 НПБ 236-97 данный вид композиционной огнезащиты отнесен к первой группе огнезащитной эффективности.

Результаты замера температуры в испытанных образцах стальных колонн с композиционной огнезащитой представлены на рис. 2.16, из которого видно, что при монотонном росте температуры среды в огневой камере печи (приблизительно до 1090 °С к концу третьего часа) температура стальной колонны, достигнув после 80 мин от начала огневого воздействия 90 °С, в дальнейшем очень медленно приближается к уровню 100 °С, так и не преодолев его до конца огневого воздействия.

Таким образом, из приведенных результатов огневых испытаний композиционной огнезащиты следует, что при правильном выборе соотношения между толщинами ее слоев удастся в полной мере реализовать сильный физический эффект продолжительной стабилизации температуры защищаемой конструкции на уровне, не превышающем 100 °С. При этом значения толщины и массы композиционной огнезащиты, как можно видеть из сравнения полученных результатов с данными предыдущих параграфов, существенно меньше соответствующих значений в вариантах простой огнезащиты.

Практическое использование различных вариантов композиционной огнезащиты показало, что способ комбинированной (композиционной) огнезащиты позволяет устранить недостатки и усилить достоинства других способов.

Основными преимуществами композиционной огнезащиты по сравнению с другими способами являются:

- существенное снижение массы (например, в 5 раз по отношению к огнезащите фосфатными покрытиями);

- уменьшение габаритных размеров конструкций с огнезащитой (до двух раз по сравнению с огнезащитой минераловатными плитами, кирпичной кладкой и т.п.);

- повышение прочности и жесткости слоистого композиционного пакета;

снижение паропроницаемости огнезащиты в исходном состоянии;

повышение вибростойкости и долговечности огнезащиты за счет механического крепления к конструкциям;

улучшение декоративных и гигиенических качеств огнезащиты;

повышение технологичности и скорости монтажа огнезащиты на объекте.

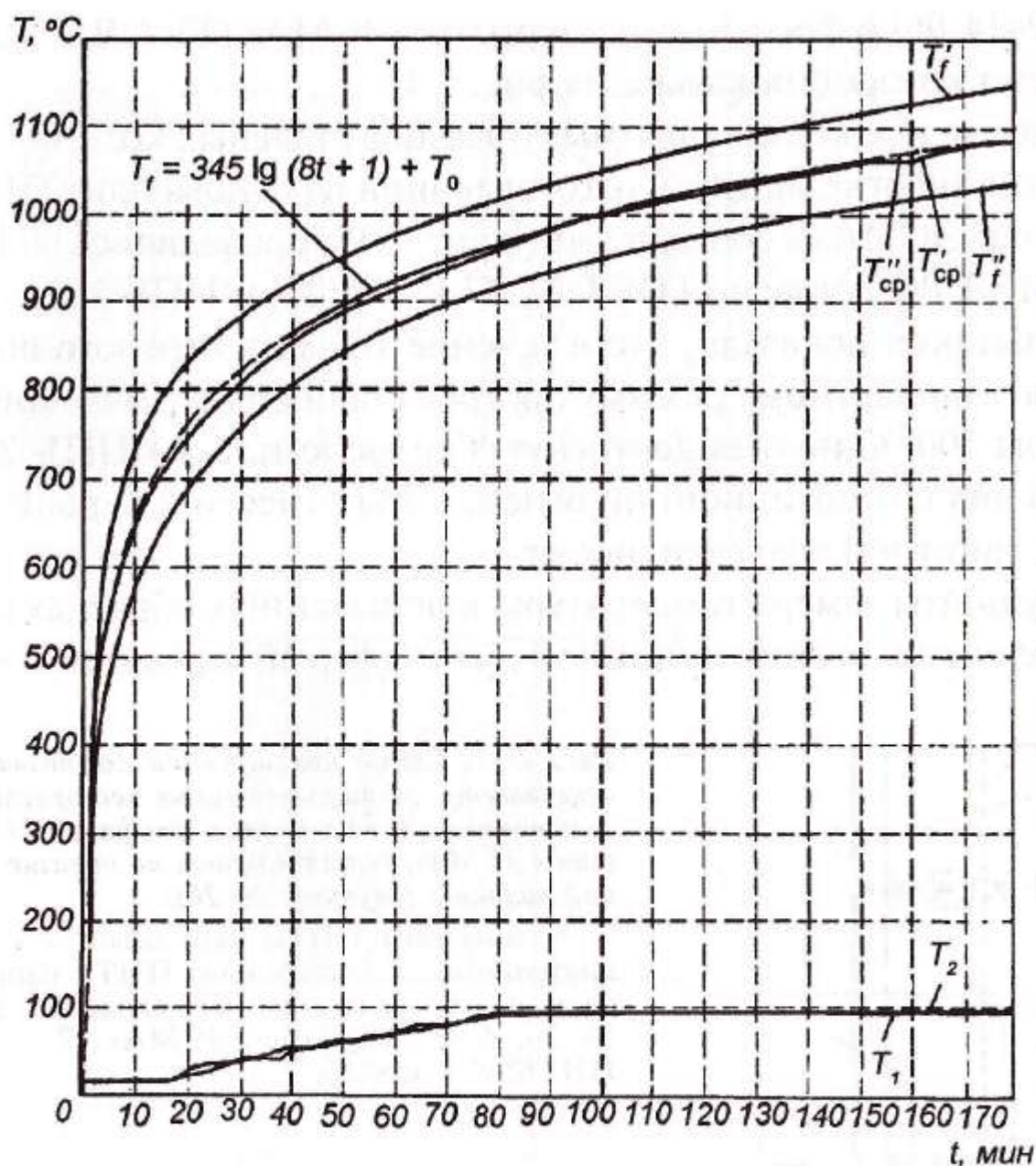


Рис. 2.16. Температурные кривые прогрева стальных колонн (двутавр № 20) с композиционной огнезащитой из термостойких негорючих базальтоволоконистых плит ПНТБ и покрытия «ЭСМА»:

T_f — стандартная температурная кривая; T'_f , T''_f — верхняя и нижняя допустимые границы отклонений от T_f ; T_0 — начальная температура среды в огневой камере печи; T_1 , T_2 — средняя температура на стальных колоннах (соответственно опыты № 1 и 2); T'_{cp} , T''_{cp} — средняя температура среды в камере огневой печи (соответственно опыты № 1 и 2)

Расчет параметров теплового воздействия на конструкции с огнезащитой в условиях пожара

Современное состояние проблемы моделирования пожаров в помещениях и требования к рациональной методике расчета их параметров.

Математическому моделированию пожаров в помещениях различных типов посвящено большое число работ.

Анализ указанных работ показывает, что наиболее изученными и отработанными являются так называемые интегральные модели пожаров. Эти модели построены с использованием усредненных по объему аварийного помещения (АП) параметров заполняющей его газовой среды: температуры, плотности, давления, концентрации компонентов.

Интегральные модели основаны на применении законов сохранения массы и энергии, представляемых в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений относительно соответствующих среднеобъемных параметров. Для замыкания этой системы уравнений используют уравнения состояния для среднеобъемных параметров состояния газовой среды и эмпирические или эмпирические зависимости для скорости выгорания пожарной нагрузки, скорости распространения пожара, суммарных тепловых потоков в ограждающие конструкции и приближенные формулы теории аэрации для параметров газообмена АП с окружающей средой через проемы. Наиболее обширный экспериментальный материал по этому направлению содержится в работах ВНИИПО. Так, во ВНИИПО проведены большие серии экспериментов на фрагментах

зданий объем 3 м^3 в диапазоне изменения отношения площадей проемов к площади пола от 4,5 до 25 % и изменения удельной пожарной нагрузки от 70 до 175 кг/м^3 . Результаты исследований зарубежных ученых в этой области наиболее подробно освещены в работах.

Следует отметить, что применимость интегральной модели пожара для расчета параметров теплового воздействия на строительные конструкции (СК) с огнезащитой в условиях пожара носит ограниченный характер. Это обусловлено, прежде всего, тем что теплоотдача различных элементов СК изучена недостаточно имеющиеся эмпирические формулы не охватывают всего многообразия СК и оборудования, а также всевозможных условий, влияющих на теплообмен элементов СК с газовой средой при пожаре. В частности, по этой причине интегральные модели не позволяют достоверно определять параметры теплового воздействия каждый элемент СК и внутренние объекты на начальной стадии пожара, а также при «локальных» пожарах.

Расширить область применения интегрального метода моделирования пожаров позволяют зональные модели. Их сущности заключается в разбиении внутреннего объема АП на зоны, в пределах которых используется интегральный метод. Зоны выбирают таким образом, чтобы в пределах каждой из них газовую среду можно было с достаточной точностью описать усредненными параметрами. Для каждой из зон составляют соответствующую систему дифференциальных уравнений, выражающих законы сохранения массы и энергии. Количество зон определяется характером решаемой задачи, а также размещением пожарной нагрузки и проемов в АП.

Наиболее детально развитие пожара в АП описывается методом

дифференциального моделирования (дифференциальными моделями). Этот метод основан на использовании системы дифференциальных уравнений в частных производных, состоящей из уравнений: неразрывности, движения газовой среды, диффузии компонентов газовой смеси, заполняющей АП, сохранения энергии и теплопроводности в ограждающих конструкциях. Для замыкания этой системы к ней необходимо добавлять уравнения кинетики горения, уравнения для параметров турбулентного переноса (модель турбулентности) и интегрально-дифференциальные уравнения лучистого переноса в газовой среде, запыленной конденсированными частицами дыма, а также соответствующие условия однозначности. Наиболее совершенной системой программного обеспечения для решения трехмерных задач такого рода, по-видимому, является известная система PHOENICS (Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integr. Code Series), разработанная корпорацией CHAM Ltd, которую основал и возглавляет профессор Д.Б. Сполдинг. Отечественным аналогом такой системы программирования (но с менее широкими возможностями относительно видов решаемых задач) является система ANES (Automatic Numerical Experiments System), разработанная сотрудниками Московского энергетического института и Института высоких температур РАН.

Дифференциальные модели позволяют получать в каждый момент времени исчерпывающую информацию о полях скорости и температуры, концентрации кислорода, продуктов сгорания, реагента, лучистых и конвективных тепловых потоках. Поэтому основной областью их применения являются локальные пожары и начальная стадия развивающегося пожара.

При практической реализации дифференциальных моделей пожара. При практической реализации дифференциальных моделей пожара учета сжимаемости газовой среды и малых перепадов давления; численного моделирования турбулентного переноса в запыленной частицами дыма среде; применения в дискретной форме кинетических моделей горения реальных многокомпонентных газовых смесей; учета рассеяния излучения на частицах дыма; определения условий однозначности.

Известны приближенные варианты реализации дифференциальной модели для двумерных задач естественной конвекции в АП простой геометрии. Например, в работе процесс горения в очаге пожара описывается не кинетической моделью, а интегрально с использованием экспериментальных данных, зона горения представлена в виде фронта с известными координатами. В этом фронте задают либо температуру (условие 1-го рода), либо Поверхностную плотность тепловыделения от горения в виде поюкка (условие 2-го рода). Турбулентный перенос и газообмен АП с окружающей средой не учитываются. В работах А.М. Рыжова, например окружающей средой не учитываются. В работах А.М. Рыжова, например в АП, процесс горения описывается на уровне брутто-реакции, скорость которой зависит от концентрации окислителя и параметров турбулентности, а турбулентный перенос учтен с помощью вихревой модели. При описании лучистой составляющей теплового потока используют приближенные модели оптически тонкого и оптически Толстого слоев. Это позволяет отказаться от решения сложных дифференциальных уравнений лучистого переноса. Выбор той или иной приближенной модели зависит от величины критерия Бугера (Bi) в каждом конкретном контрольном объеме расчетной области. При значениях $Bi = \kappa(T) A / < 1$ (где $\kappa(T)$ — коэффициент ослабления газовой

среды; A — характерный размер сетки) применяют модель оптически тонкого слоя, а при $Bu > 1$ — модель оптически толстого слоя. Значения $\kappa(T)$ для данного вида пожарной нагрузки определяют экспериментально.

Нами предложена комбинированная модель пожара, основанная на рациональном сочетании интегральной и дифференциальной моделей .

На базе материалов анализа характерных пожароопасных ситуаций и опыта аналогичных исследований, проведенных авторами ранее, разработана типовая расчетная схема аварийного помещения с проемами, через которые происходит газообмен с объектами, подлежащими огнезащите.

Вся расчетная область разделена на основные подобласти зоны, принципиально отличающиеся друг от друга характером происходящих в них процессов. Для каждой из зон выделен определяющий процесс и сформулированы упрощающие предположения. В дальнейшем этим зонам поставлены в соответствие конкретные блоки математического описания.

В зоне газификации горючего определяющим является процесс пиролиза, сопровождающийся выделением горючих газов поглощением теплоты. Процесс протекает в слое, ограниченно; изотермическими поверхностями с постоянными температура «начала» и «конца» разложения. Эти поверхности с течением времени перемещаются в глубь горючего.

Состав газов пиролиза, поступающих в зону пламени, принимается равновесным и находится термодинамическим расчетом по заданному составу горючего.

Массовая скорость выхода газов пиролиза зависит от плотности падающего на поверхность горючего теплового потока и скорости распространения пламени, рассчитываемой по эмпирически формулам.

Определяющим процессом в зоне пламени является взаимодействие горючих газов пиролиза с окислителем, которое сопровождается выделением теплоты. Зона пламени рассматривается как область, ограниченная изотермической поверхностью, имеющей температуру около 500 °С, а тепловыделение считается равномерным, но распределенным по объему зоны. Интенсивность тепловыделения принимается пропорциональной среднеобъемной концентрации окислителя.

Процесс горения схематизируется в виде одноступенчатой «суммарной» реакции между горючими газами пиролиза и кислородом с заданным коэффициентом стехиометрии. Для определения среднеобъемного состава газовой смеси, заполняющей свободный объем аварийного помещения, используются дифференциальные уравнения сохранения массы компонентов смеси, заимствованные из интегральной модели пожара.

Для определения полей температуры и скорости газов в свободном объеме аварийного помещения рассматривается нестационарное турбулентное движение в плоскости расчетного сечения, сжимаемой и теплопроводной газовой смеси под действием подъемной силы. Это движение описывается известной системой дифференциальных уравнений переноса массы, количества движения и энергии в прямоугольной системе координат, лежащей в плоскости расчетного сечения, которая проводится в направлении основного свободноконвективного потока: через центры очага пожара и проема.

Входящие в систему уравнений вязкость и теплопроводность газовой смеси в соответствии с гипотезой Бусинеска представляются в виде суммы молекулярной и турбулентной составляющих. Кроме того, в теплопроводность дополнительно вводится лучистая составляющая, пропорциональная, в приближении Росселанда, кубу температуры.

Для постановки граничных условий к уравнениям движения в tone проема рассматривается процесс перетекания горячих газов Наружу, а холодного воздуха внутрь аварийного помещения. Граничные условия в проемах задаются на основе расчета профилей скорости в проеме и расходов поступающего в АП воздуха и уходящих из него газов с помощью интегральной модели пожара, численная реализация которой разработана в МИПБ МВД РФ под руководством профессора Ю.А. Кошмарова.

Для ограждающих конструкций определяющим процессом является теплопередача от горячих газов, движущихся внутри аварийного помещения, к атмосфере или среде смежного помещения. Этот процесс описывается одномерным уравнением теплопроводности с соответствующими граничными условиями.

Внутренний объект представляется как система, состоящая из относительно тонкой оболочки с огнезащитой, ядра, все размеры которого заданы, и воздушной прослойки произвольной формы, расположенной между оболочкой и ядром.

Благодаря относительно малой теплоемкости прослойки процесс теплопередачи через нее рассматривается в квазистационарном приближении. При этом учитываются влияние свободной конвекции

воздуха и лучистый теплообмен между внутренней поверхностью оболочки и наружной поверхностью ядра.

Для описания процесса нестационарного прогрева внутренних объектов с огнезащитой используется дифференциальное уравнение теплопроводности, позволяющее учитывать:

поглощение теплоты при физико-химических превращениях;
наличие или образование пористости при нагреве материала; перенос массы газов или паров в пористом материале; вспучивание и усадку материала в процессе нагрева.

Влияние переменной пористости и деформации на теплофизические характеристики огнезащитных материалов с разлагающимся при нагреве каркасом учитывается с помощью трехуровневой модели их макроструктуры.

Для волокнистых и пористых материалов с неразлагающимся каркасом принята более простая двухкомпонентная модель макроструктуры. Лучистый перенос теплоты в материалах с полупрозрачным каркасом учитывается в приближении Росселанда, а в материалах с непрозрачным каркасом — с помощью модели черных экранов.

В качестве предельного состояния рассматриваемой системы принимается потеря несущей способности или воспламенение ядра. Предельному состоянию соответствуют критические условия, которые формулируются в виде равенства температуры ядра предельному значению. Например, для несущих стальных конструкций предельная температура составляет около 500 °С.

Для решения системы дифференциальных уравнений свобод-

ноконвективного тепломассопереноса использован известный алгоритм С. Патанкара.

Нелинейное уравнение нестационарной теплопроводности, входящее во многие блоки алгоритма комплексной задачи, решалось методом конечных разностей по неявной четырехточечной схеме с итерациями на каждом временном слое.

К параметрам модели, предназначенным для переноса результатов модельных стендовых экспериментов на натуру, отнесены: параметр принятой алгебраической модели турбулентности; параметр лучистого переноса теплоты в газах; параметр лучистого переноса теплоты в огнезащите.

Кроме того, выделены коэффициенты и параметры, подлежащие экспериментальному определению в лабораторных условиях: коэффициенты вспучивания или усадки разлагающихся материалов;

параметры кинетики пиролиза материалов; теплофизические характеристики материалов в исходном состоянии.

Остальные коэффициенты берутся из справочников.

Приведение заданного реального пожара к стандартному пожару по огнестойкости рассматриваемой строительной конструкции осуществляется расчетным путем. Для рассматриваемой СК сначала рассчитывается фактический предел огнестойкости по одному из предельных состояний при заданной температурной кривой реального пожара. Затем по данному предельному состоянию определяется значение фактического предела огнестойкости при стандартном температурном режиме. Полученное

значение предела огнестойкости и будет эквивалентным значением огнестойкости для заданного реального пожара.

Аналогичным образом производится перерасчет фактического предела огнестойкости СК, определенного экспериментально при стандартном огневом испытании, на предел огнестойкости при заданном реальном пожаре. Вначале добиваются совпадения расчетных и экспериментальных значений фактического предела огнестойкости СК при стандартном режиме, после чего по этой же методике рассчитывают фактический предел огнестойкости при заданном реальном температурном режиме.

ФИЗИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА КОМПЛЕКСНОЙ СОПРЯЖЕННОЙ ЗАДАЧИ О РАЗВИТИИ ПОЖАРА В АВАРИЙНОМ ПОМЕЩЕНИИ

Постановка задачи включает: анализ пожароопасных ситуаций в конкретных помещениях, их геометрическую схематизацию, физическую схематизацию процессов, происходящих в аварийных помещениях при пожаре, выбор математических моделей для их описания.

В результате анализа пожароопасных ситуаций выбирается наиболее вероятная из них, а также определяются: качественный характер пожарной нагрузки (типы горючих или поддерживающих горение материалов, находящихся в помещении), масса пожарной нагрузки, геометрические параметры распределения пожарной нагрузки в помещении, расположение наиболее вероятных источников зажигания. Кроме того, определяется расположение по отношению к вероятному очагу пожара несущих элементов конструкции и внутренних объектов, нуждающихся в противопожарной защите.

Очевидная сложность процессов, происходящих в АП при пожаре, обуславливает важность их рациональной схематизации — разработки такой расчетной схемы, которая, с одной стороны, сохраняла бы все их определяющие черты, а с другой — давала бы возможность построить достаточно простой алгоритм расчета.

Причем упрощающие предположения и допущения, по понятным причинам, должны приниматься с учетом получения в последующем расчетных оценок «сверху», т.е. оценок, гарантирующих отклонение расчетных значений параметров от истинных в сторону завышения.

Разработка расчетных схем производилась на основе результатов

проведенного в работе [26] анализа пожароопасных ситуаций в подземных сооружениях с использованием экспериментальных данных.

Наиболее рациональными и универсальными по отношению к реальным пожароопасным ситуациям представляются расчетные схемы, приведенные на рис. 4.1. На них показаны основные подобласти (зоны) расчетной области, принципиально отличающиеся одна от другой по характеру происходящих в них тепломассообменных процессов. Разумеется, в каждом конкретном случае число этих зон и их пространственная геометрия будут различными. При построении расчетного алгоритма удобно их рассматривать и описывать математически по отдельности, устанавливая связь между соответствующими уравнениями через граничные условия. Важно для каждой из зон выделить определяющие физические процессы и сформулировать свои упрощающие допущения.

Зона газификации горючего. Определяющим физическим (физико-химическим) процессом в зоне горючего является испарение для случая жидкого горючего или термическое разложение для случая, когда горючим является дерево, полимерный материал и т.п.¹. Этот процесс сопровождается поглощением теплоты. Во многих практически важных случаях для него «проходит» допущение

оквазистационарности.

В геометрическом отношении горючее можно представить в виде достаточно протяженного слоя заданной толщины, теплоизолированного по «холодной» поверхности. Задается площадь поверхности горючего (горения) либо как константа (разлитое жидкое горючее), либо как

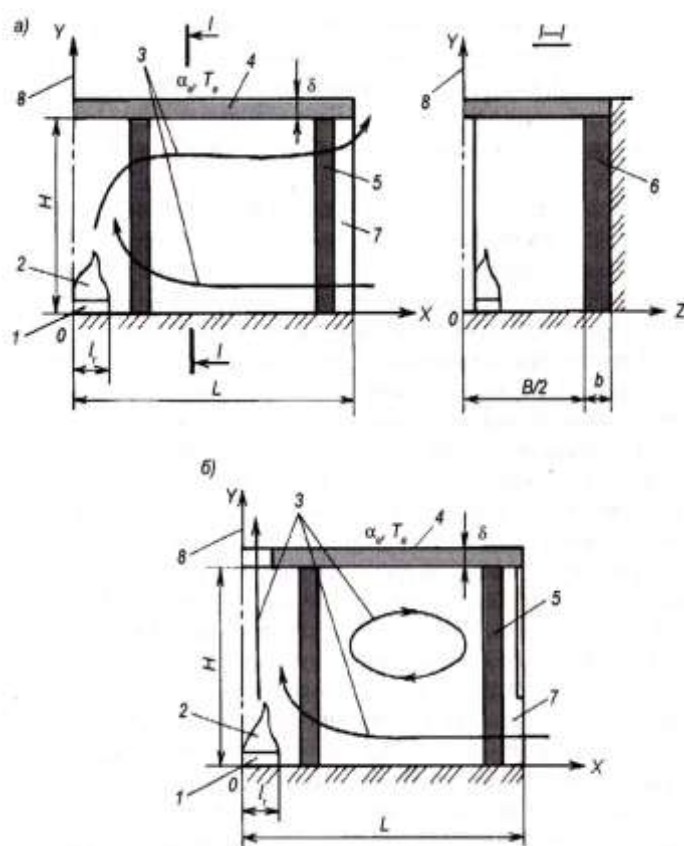
функция времени.

Состав продуктов газификации горючего считается равновесным и определяется термодинамическим расчетом по элементному составу горючего.

Зона горения. Определяющими процессами в этой зоне являются: выделение теплоты и продуктов сгорания, поглощение (расход) горючих газов и кислорода.

В геометрическом отношении зону горения можно рассматривать или как узкий фронт, расположенный у поверхности горючего, или как область, ограниченную изотермической поверхностью

'В частном случае, когда горючим является газ, вытекающий из аварийной зоны, в расчет как исходное данное вводится массовая скорость его поступления Рис. 4.1. Расчетные схемы теплового воздействия на конструкции при пожаре в аварийном помещении:



a — при неработающей аварийной вентиляции (системе дымоудаления);
б — при работающей аварийной вентиляции; **1** — горючее с переменной или постоянной поверхностью горения; **2** — зона горения (пламя); **3** — зона двумерной конвекции газовой среды АП; **4** — многослойное перекрытие толщиной *5*; **5** — колонна; **6** — стена; **7** — проем; **8** — ось симметрии; *Г* — температура газовой среды смежного помещения; *a*, — коэффициент конвективной теплоотдачи от поверхности перекрытия к газовой среде смежного помещения; *L, H, B, b* — геометрические параметры расчетной области; *l_г* — длина зоны горючего

с температурой, равной температуре воспламенения смеси углеводородов с воздухом (около 500 °С). Тепловыделение при этом можно считать равномерно распределенным либо по поверхности фронта горения, либо по объему зоны горения.

Процесс горения можно рассматривать как одноступенчатую «суммарную» реакцию между горючими газами, поступающими в

зону горения из слоя горючего, и окислителем. Скорость реакции горения в общем случае зависит от концентрации окислителя и давления, а также от интенсивности турбулентного перемешивания газовой среды в зоне горения. В первом приближении ее можно считать зависящей только от осредненной концентрации окислителя.

Температурное поле в зоне горения определяется процессами теплопроводности, лучистого переноса теплоты (в основном между частицами сажи) и свободной конвекции газов, а также лучистым теплообменом факела пламени с ограждающими поверхностями (при относительно невысоком уровне задымленности АП).

Зона двумерной конвекции. Определяющими здесь являются процессы свободноконвективного тепломассопереноса в газовой среде, заполняющей объем аварийного помещения.

Для нахождения распределений по объему АП температуры и скоростей течения газа рассматривается при малых числах Маха нестационарное турбулентное движение вязкого сжимаемого и теплопроводного газа с эффективными теплофизическими характеристиками в плоскости расчетного сечения (в двумерном приближении). Плоскость расчетного сечения АП располагается вертикально в направлении основных конвективных потоков и проходит через центры очага пожара (зону горения) и проемов.

В данном случае свойство сжимаемости среды существенно проявляется вследствие значительных изменений температуры по объему аварийного помещения. Свободноконвективное движение газа развивается под действием подъемной силы, обусловленной разностью плотностей горячих и холодных газовых объемов. При работающей аварийной вентиляции оно «накладывается» на соответствующее вынужденное движение газа. Турбулентность течения учитывается с помощью полуэмпирической модели.

Газовая среда, заполняющая свободный объем аварийного помещения, в течение всего процесса горения и последующего охлаждения принимается нерассеивающей, а тепловое излучение — серым (с параметрами, не зависящими от длины волны). Перенос теплоты излучением в оптически плотной газовой среде учитывается в приближении Росселанда через лучистую составляющую суммарного коэффициента теплопроводности газа, запыленного частицами сажи.

Сток теплоты из зоны конвекции в боковые ограждающие конструкции в направлении, перпендикулярном плоскости расчетного сечения, учитывается введением в уравнение сохранения энергии газа «стокового» члена.

Оборудование, расположенное между плоскостью расчетного сечения и «стенкой», включается в состав последней дополнительным слоем с эффективными теплофизическими характеристиками, учитывающими не только кондуктивную теплопроводность «компонентов», но и естественную конвекцию, а также излучение (в приближении Росселанда).

Для определения состава газовой смеси в АП и среднего давления используется интегральная модель пожара.

Проемы и вентиляционные отверстия. Через проемы и вентиляционные отверстия происходит газообмен АП с газовой средой смежных помещений или с атмосферой.

В случае неработающей аварийной вентиляции через нижнюю часть проема поступает воздух, а через верхнюю — выходит нагретая газовая смесь. Встречные потоки в проеме разделяет нейтральный слой, в котором скорость движения газа равна нулю. При работающей вентиляции через все сечение проема поступает воздух с известным расходом, а через вентиляционные отверстия удаляется дым.

Ограждающие конструкции (стены, перекрытия). Определяющим процессом в данном случае является процесс теплопередачи от внутренней горячей газовой смеси к менее нагретой среде смежного помещения или к холодной окружающей среде через многослойную «стенку».

В качестве основных допущений здесь принимаются допущения об одномерности температурного поля в «стенке» и об идеальном тепловом контакте между ее слоями. Если в «стенке» имеются воздушные прослойки, в них также учитывается перенос теплоты не только теплопроводностью, но и конвекцией и излучением.

В определенных зонах «стенки», примыкающих к проемам, при относительно большой тепловой инерционности «стенки» возможен ее двухсторонний нагрев: горячим газом АП и нагревающейся газовой средой смежного помещения.

Обмен теплотой между ограждающими поверхностями и газовой средой происходит конвекцией и излучением. Для определения коэффициента конвективного теплообмена по найденным из решения задачи газовой динамики параметрам течения используются эмпирические критериальные формулы и формулы, полученные с помощью интегральных уравнений пограничного слоя [58]. Для расчета интенсивности лучистого теплообмена между факелом пламени и ограждающими поверхностями при относительно небольшом уровне задымленности АП используются угловые коэффициенты облученности, которые определяются из расчета для принятой геометрической схематизации обменивающейся излучением системы. В случае оптически плотной газовой среды используется модель параллельных диффузно-серых поверхностей с заданными степенями черноты.

Теплота от стены к грунту переносится теплопроводностью. На соответствующей границе ставится условие неразрывности теплового потока.

Внутренний объект¹. Во внутреннем объекте определяющим является

процесс нестационарной теплопроводности под влиянием сложного теплообмена его наружной поверхности с газовой средой АП при отсутствии стока теплоты из внутренней полости.

Наиболее рациональной геометрической схематизацией внутреннего объекта является схема «теплоемкое равномерно прогретое внутреннее ядро, окруженное многослойной оболочкой, через которую перетекает теплота в ядро». Между оболочкой и ядром находится воздушная прослойка, в которой развивается свободноконвективное течение. Теплопередача от оболочки к ядру происходит за счет теплопроводности, конвекции и излучения.

Принимаются допущения об одномерности температурного поля в оболочке и о квазистационарности теплопередачи через воздушную прослойку.

Источники массы. Под источниками массы понимаются локальные участки ограждающей поверхности, через которые поступают с заданной интенсивностью (массовой скоростью) кислород, воздух, инертный газ и (или) тушащий состав. Эти источники учитываются при описании тепломассопереноса в АП. При подаче жидкости учитывается физический процесс ее испарения.

В геометрическом отношении зоны схематизируются как участки ограждающей поверхности с заданными площадью, удельным потоком массы и температурой.

Таким образом, в предложенной постановке задача расчета температурных полей (тепловых потоков) в аварийном и смежном помещениях с внутренними объектами и ограждающими конструкциями является

сопряженной.

Наряду с изложенным при постановке задачи важное значение имеет формулировка условий воспламенения (распространения пламени) и потухания (окончания пламенного горения). В рас–

В качестве внутренних объектов могут рассматриваться колонны, приборы, оборудование и т.п.

В рассматриваемом случае, имея в виду получение «оценок сверху», эти условия целесообразно сформулировать следующим образом:

2.1. Воспламенение разлитых легковоспламеняющихся жидкостей при включении источника зажигания происходит мгновенно по всей поверхности разлива.

2.2. Воспламенение твердых горючих материалов происходит в тот момент, когда температура их поверхности достигает значения температуры воспламенения смеси углеводородов с воздухом (400 — 500 °C).

2.3. Потухание (самогашение пламени) происходит при выполнении одного из условий:

а) уменьшение концентрации кислорода в зоне горения до критического значения (11 — 14%);

б) уменьшение температуры ниже температуры воспламенения смеси углеводородов с воздухом;

в) полная газификация горючего (завершение термического разложения).

Математическое описание процессов, происходящих в АП, строится на основе фундаментальных законов сохранения массы, количества движения и энергии, выраженных в форме обобщенного дифференциального уравнения переноса субстанции C :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \operatorname{div}(Cv) + \operatorname{div} j_c = c_0, \quad (4.1)$$

где v — вектор скорости среды; j_c — вектор плотности диффузионного потока субстанции; c_0 — интенсивность объемных источников (стоков) субстанции.

Первое слагаемое левой части уравнения (4.1) выражает локальное изменение во времени объемной концентрации (содержания в единице объема) переносимой субстанции, второе слагаемое — конвективный перенос субстанции через элементарный объем и третье слагаемое — диффузионный перенос.

Под субстанцией C понимается парциальная плотность компонента газовой смеси или количество движения¹, или энергия единицы массы.

При построении расчетного алгоритма для каждой из рассмотренных выше зон уравнение (4.1) упрощается в соответствии с

В этом случае вместо оператора div используется оператор $\operatorname{Div}(pv)$, $\operatorname{Div}(j)$, где p — тензор давления, а роль «источников» количества движения играют объемные и массовые силы.

принятыми допущениями и записывается в проекциях на оси выбранной системы координат. К полученной таким образом системе дифференциальных уравнений добавляются замыкающие соотношения для входящих в нее параметров.

Математическое описание процессов, происходящих при развитии пожара в рассматриваемой системе

Слой горючего.

Определяющим процессом в данной расчетной подобласти является процесс термического разложения (для твердых органических или полимерных горючих, не образующих расплава) или испарения (для жидких горючих, а также для твердых горючих, образующих на нагреваемой поверхности расплав). *Основной целью расчета в этом случае является определение состава и массовой скорости выхода газов с нагреваемой поверхности слоя горючего.*

Математическое описание кинетики газообразования при нагреве элементарного объема органического вещества, например древесины или полимера, строится на основе выбранной кинетической схемы процесса его термического разложения (пиролиза). Из опыта, накопленного нами в ходе многолетних исследований в данной области, вытекает, что наиболее универсальной схемой, пригодной для описания кинетики пиролиза органических веществ (полимерных материалов) различных типов, является двухстадийная кинетическая схема вида:



где M — исходный материал; P — пирозоль, т.е. промежуточный конденсированный продукт пиролиза, образующийся из M в результате выделения газообразных продуктов Γ на 1-й стадии;; K_o — прококсированный остаток, образующийся из пирозоля на 2-й стадии; k_1, k_2 — константы скоростей 1-й и 2-й стадий процесса пиролиза.

Для математического описания кинетики реакции вида (4.2) можно воспользоваться достаточно отработанным аппаратом химической кинетики. В предположении о первом порядке суммарной реакции на каждой из стадий пиролиза кинетические уравнения для схемы (4.2) имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(\rho_m \varphi_m)}{dt} &= -\rho_m \varphi_m k_1; \\ \frac{d(\rho_p \varphi_p)}{dt} &= K_1 \rho_m \varphi_m k_1 - \rho_p \varphi_p k_2; \\ \frac{d(\rho_k \varphi_k)}{dt} &= K_2 \rho_p \varphi_p k_2; \\ k_1 &= G A_1 \exp(-E_1/RT); k_2 = A_2 \exp(-E_2/RT), \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

где ρ_a, φ_a — актуальные значения истинной плотности и объемной доли a -компонента конденсированной фазы, состоящей из исходного материала, пирозоля и кокса (индексы m, p и k); A_1, A_2 и E_1, E_2 — предэкспоненты и энергии активации соответствующих стадий; G — (T —

$T_0)/(T-7)$ — поправка, учитывающая резкое ускорение процесса газификации при приближении текущей температуры в элементарном объеме (7) к температуре достижимого прогрева полимера $(T)'$; K_1, K_2 — предельные массовые доли конденсированного остатка на 1-й и 2-й стадиях; R — универсальная газовая постоянная.

Процесс пиролиза материалов, не образующих кокса при пиролизе, например термопластов типа полиэтилена, протекает в одну стадию. При этом в уравнениях (4.3) $K_1, K_2 = 0$ и $\kappa_2 = 0$.

В данном случае на основании закона сохранения массы можно записать следующее очевидное соотношение между парциальными плотностями компонентов пиролизующегося материала и его исходной плотностью ρ_0 :

$$\rho_M \varphi_M + \rho_n \varphi_n + \rho_x \varphi_x + \rho_r \varphi_r = \rho_0 \quad (4.4)$$

Продифференцировав выражение (4.4) по времени и подставив в него правые части уравнений (4.3), получим формулу для скорости выделения массы газов пиролиза в единице объема разлагающегося материала в виде:

$$\dot{R} = \frac{d\rho_g \varphi_g}{dt} = (1 - K_1)k_1 \rho_M \varphi_M + (1 - K_2)k_2 \rho_n \varphi_n. \quad (4.5)$$

Кинетические параметры $A_1, A_2, E_1, E_2, K_1, K_2$, входящие в уравнения (4.3), (4.5), определяются на основании экспериментальных термогравиметрических кривых (кривые изменения массы представительного образца данного материала от времени в ходе его динамического нагрева).

Наряду с изложенной дифференциальной моделью кинетики пиролиза, которая является универсальной по отношению к скорости нагрева пиролизующегося материала, на практике целесообразно использовать и более простую интегральную модель. Согласно этой модели объемная скорость газовыделения определяется по формуле:

$$R = \rho_0(1 - K) \frac{dx(T)}{dt} \quad (4.6)$$

где K — коксовое число материала; x — степень завершенности пиролиза ($0 \leq x \leq 1$).

Зависимость $x(T)$ при данной (постоянной) скорости нагрева находится непосредственно из экспериментальной зависимости текущей массы нагреваемого образца от температуры $m(T)$ в соответствии с выражением:

$$x(T) = \frac{m_0 - m(T)}{m_0 - m_k}$$

где m_0, m_k — начальное и конечное значения массы образца исследуемого материала.

Необходимо отметить, что при скоростях нагрева, превышающих 3—5

К/с, форма кривой $X(T)$ и величина K слабо зависят от скорости нагрева. Это дает право в приближенных расчетах применительно к условиям пожара, когда скорость нагрева, как правило, превышает 5 К/с, использовать единую интегральную аппроксимацию $X(\Gamma)$, определенную при указанной скорости нагрева, которая реально достижима на серийно выпускаемых приборах для термического анализа.

Степень завершенности пиролиза связана с текущими значениями массы газа, выделившейся из единицы объема разлагающегося материала, очевидным соотношением:

$$x = \rho_r \varphi_r / [\rho_0 (1 - K)]$$

Равновесный состав газов пиролиза находится по элементарному составу разлагающегося материала путем термодинамического расчета.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что процесс термического разложения можно приближенно рассматривать как одноступенчатую необратимую «суммарную» реакцию вида:

$$\begin{matrix} \text{C} & \text{H} & \text{O} & \text{Cl} \\ \gamma_1 & \gamma_2 & \gamma_3 & \gamma_4 \end{matrix} =$$

$$= \left(\bar{m}_{\text{CH}_4} + \bar{m}_{\text{H}_2} + \bar{m}_{\text{CO}} + \bar{m}_{\text{CO}_2} + \bar{m}_{\text{H}_2\text{O}} + \bar{m}_{\text{HCl}} \right) (1 - K) + K, \quad (4.7)$$

γ_i — массовая доля соответствующего элемента в материале; $\bar{m}_\alpha$ — массовая доля компонента в смеси газов пиролиза.

Из уравнения (4.7) видно, что смесь газов пиролиза состоит из двух частей — горючей и негорючей (инертной):

$$\bar{m}_T + \bar{m}_H = 1; \bar{m}_T = \bar{m}_{CH_4} + \bar{m}_{H_2} + \bar{m}_{CO}; \bar{m}_H = \bar{m}_{H_2O} + \bar{m}_{CO_2} + \bar{m}_{HCl}.$$

Отсюда следует вывод, что снижать горючесть материала можно увеличивая в его составе содержание галогенов, связывающих водород.

Для нахождения неизвестных m_a в соответствии с уравнением (4.7) можно использовать четыре уравнения материального баланса, соотношение между m_a и выражение для константы равновесия реакции:

$$H_2 + \left. \begin{aligned} & \left(\bar{m}_{CH_4} A_C / M_{CH_4} + \bar{m}_{CO} A_C / M_{CO} + \bar{m}_{CO_2} A_C / M_{CO_2} \right) \times \\ & \times (1 - K) + K = \gamma_1; \\ & \left(4\bar{m}_{CH_4} A_H / M_{CH_4} + 2\bar{m}_{H_2} A_H / M_{H_2} + \right. \\ & \left. + 2\bar{m}_{H_2O} A_H / M_{H_2O} + \bar{m}_{HCl} A_H / M_{HCl} \right) (1 - K) + K = \gamma_2; \\ & \left(\bar{m}_{CO} A_O / M_{CO} + 2\bar{m}_{CO_2} A_O / M_{CO_2} + \bar{m}_{H_2O} A_O / M_{H_2O} \right) \times \\ & \times (1 - K) + K = \gamma_3; \\ & \left(\bar{m}_{HCl} A_{Cl} / M_{HCl} \right) (1 - K) = \gamma_4; \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

$$\sum_{\alpha=1}^6 \bar{m}_{\alpha} = 1; \quad (4.9)$$

$$K_p(T) = \frac{\bar{m}_{H_2} \bar{m}_{CO_2} M_{H_2O} M_{CO}}{\bar{m}_{H_2O} \bar{m}_{CO} M_{H_2} M_{CO_2}}, \quad (4.10)$$

где A — атомная масса соответствующего элемента; M — молекулярная масса соответствующего газа.

Из записанной выше системы шести уравнений определяется шесть

неизвестных:

$$\bar{m}_{CH_4}, \bar{m}_{CO}, \bar{m}_{CO_2}, \bar{m}_{H_2}, \bar{m}_{H_2O}$$

Таким образом, уравнения (4.3) — (4.10) позволяют определить интенсивность газовыделения и состав газов пиролиза при нагреве элементарного объема материала. Для нахождения удельной массовой скорости выхода газов из слоя неравномерно прогретого горючего необходимо проинтегрировать выражение для скорости объемного газовыделения (4.5) или (4.6) по толщине зоны, расположенной между нагреваемой поверхностью и изотермой начала разложения (рис. 4.2):

$$\dot{m}_w'' = - \int_{y_{нр}}^{y_w} R dy. \quad (4.11)$$

В связи с тем что, как видно из формул (4.5) и (4.6), R является функцией температуры, для ее нахождения необходимо решить задачу нестационарного прогрева слоя горючего, которая в наиболее сложном случае материалов, претерпевающих при нагреве усадку (например, пенопласт, древесина и т.п.), формулируется следующим образом.

Исходя из общего уравнения (4.1) уравнение нестационарной теплопроводности в слое горючего с подложкой при сформулированных в § 4.2 допущениях в системе координат OF (см. рис. 4.2) имеет вид:

$$c' \rho' (1 - \varphi) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \dot{m}'' c_p'' \frac{\partial T}{\partial y} - \omega,$$

Где c' , ρ' – теплоемкость и плотность каркаса пористого прогретого слоя горючего; φ – текущая пористость; λ – эффективная теплопроводность, m'' – массовая скорость фильтрации газов пиролиза внутри сообщающихся пор; c_p'' – теплоемкость газов пиролиза; ω – объемная мощность стоков тепла в зоне термического разложения

Пористость материала зависит от степени его термического разложения (χ) и усадки:

$$\varphi = 1 - \frac{\rho'_0[1 - \chi(1 - K)](1 - \varphi_0)}{\rho'(1 - \varepsilon_y)},$$

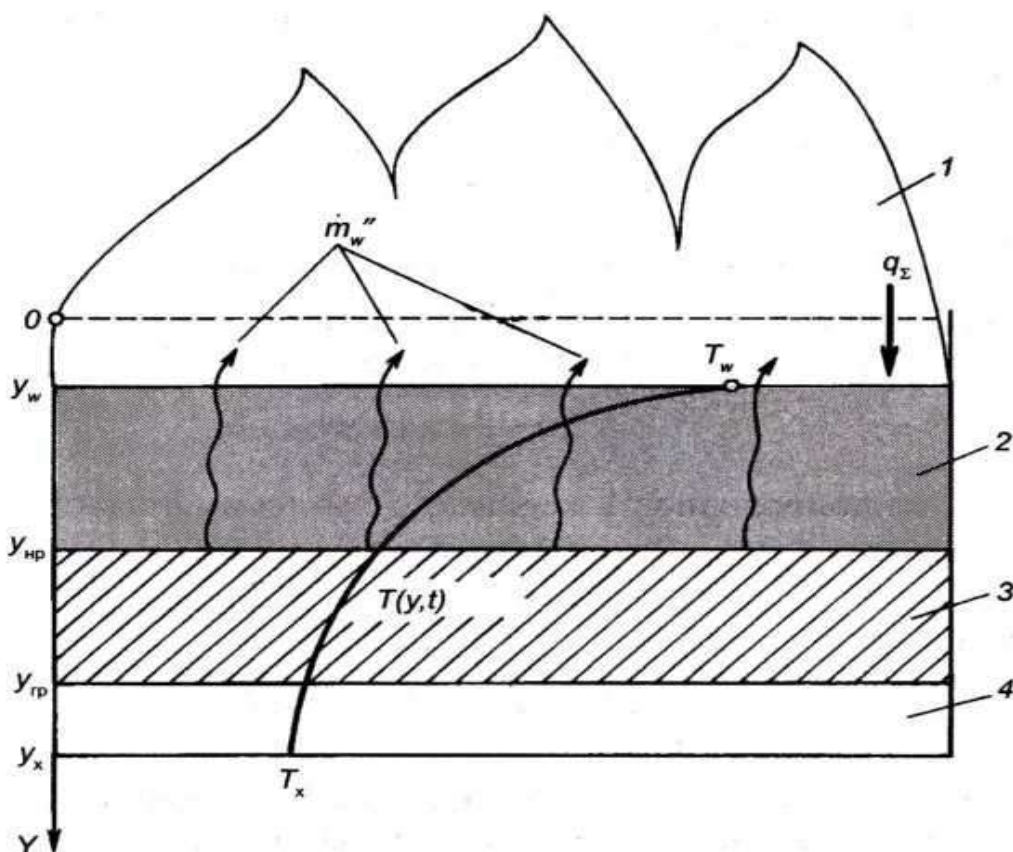


Рис. 4.2. Расчетная схема горючего:

1 — факел пламени; 2 — зоны кокса и термического разложения; 3 — неразложившийся материал; 4 — негорючая «подложка»; m_w'' — массовая скорость выхода газов пиролиза из слоя горючего; q_z — суммарный тепловой поток на поверхности горючего; $T(y,t)$ — актуальный профиль температуры в слое горючего; T_w , T_x — температура поверхности горючего и холодной поверхности; y_w , y_{np} — координаты нагреваемой поверхности и изотермы начала термического разложения горючего; y_x , y_z — координаты холодной поверхности «подложки» и границы между горючим и «подложкой»; ----- начальное положение поверхности

Массовая скорость фильтрации m'' определяется по формуле, аналогичной (4.11), в которой верхний предел интегрирования

переменный.

Входящий в формулу суммарный тепловой эффект пиролиза определяется экспериментально с помощью калориметров или расчетом на основании закона Гесса по теплотам образования исходного вещества и продуктов пиролиза:

$$L_v = \left(\sum_{\alpha} \bar{m}_{\alpha} \Delta H_{\alpha} \right) (1 - K) + \Delta H_k K - \Delta H_0,$$

где ΔH_{α} , ΔH_k — теплота образования соответствующих продуктов

пиролиза; ΔH_0 — теплота образования горючего.

Эффективная теплопроводность пористого разлагающегося материала определяется по известной формуле [150]:

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda'(1 - \varphi) + \lambda''\varphi, \quad (4.15)$$

где λ' — теплопроводность каркаса; λ'' — суммарная теплопроводность пор.

Суммарная теплопроводность пор рассчитывается с учетом кондуктивного и лучистого переноса теплоты:

$$\lambda'' = b_0 + b_1 T + (1 - \varepsilon_y) \Theta T^3, \quad (4.16)$$

где B_0 , B_1 — параметры аппроксимации кондуктивной теплопроводности смеси газов пиролиза, рассчитываемые по ее составу и свойствам компонентов

Для расчета объемной деформации используется формула:

$$\varepsilon_y = \beta_y \chi'', \quad (4.17)$$

Уравнение (4.12) решается при следующих начальном и граничных условиях: начальное условие:

$$T(y, 0) = T_0; \quad (4.18)$$

граничные условия: условие на обогреваемой поверхности с учетом малости (по сравнению с лучистым теплообменом) кондуктивного и конвективного видов теплообмена вследствие «оттесняющего» влияния газообразных продуктов разложения может быть представлено в виде:

$$-\lambda_{\Sigma} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=y_w+0} = A_{\text{эф}} \sigma (T_f^4 - T_w^4); \quad (4.19)$$

условие на границе между слоем горючего и подложкой:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=y_m-0} = \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=y_m+0}; \quad (4.20)$$

$$T \Big|_{y=y_m-0} = T \Big|_{y=y_m+0}; \quad (4.21)$$

условие на наружной границе подложки

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=y_x-0} = \alpha_n (T_x - T_0). \quad (4.22)$$