

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**
СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 8 (620)
Август 2010 г.

Научно-теоретический журнал
Издается с марта 1958 г.
Выходит один раз в месяц

Главный редактор В.Г. Себешев

Редакционная коллегия: А.А. Афанасьев,
В.Л. Баладинский, Т.И. Баранова, В.А. Воробьев,
П.А. Дмитриев, В.А. Игнатьев, В.И. Костин (зам. гл.
редактора), Г.Б. Лебедев (зам. гл. редактора),
Е.М. Лобанов, Л.С. Ляхович, В.И. Морозов,
Ю.П. Панибратов, Ю.А. Попов, Ю.П. Правдивец,
В.Г. Себешев, И.Б. Соколов, Ю.А. Феофанов,
Е.М. Чернышов

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113.
Тел./факс 266-28-59.
www.sibstrin.ru E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 10.09.10. Формат 70×108¹/16.
Усл. печ. л. 10,85+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 600.

ООО «Партнеры Сибири»,
630005, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 16.

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2010

СОДЕРЖАНИЕ

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ
КОНСТРУКЦИИ**

Белаш Т.А.,

Казарновский В.С. Не-
традиционные методы по-
вышения сейсмостойкости
зданий и сооружений (оте-
чественный и зарубежный
опыт) 3

**ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕР-
НЫХ СООРУЖЕНИЙ**

**Никитенко А.Ф., Резни-
ков Б.С., Кучеренко И.В.**
Предельное равновесие тел
в случае плоского напря-
женного состояния с ис-
пользованием обобщенного
критерия прочности 12

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МА-
ТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ**

**Селяев В.П., Куприяшки-
на Л.И., Коровина О.Ю.,
Кечуткина Е.Л.** Примене-
ние модели Бозе–Эйнштейна
для анализа временной зави-
симости прочности компози-
ционных материалов при со-
вместном действии агрессив-
ных сред, температуры и
механических напряжений 21

**Овчаренко Г.И., Бров-
кина Н.Г., Быков В.Г.,
Изосимов М.П.** Роль со-
лей в составах гидроизоля-
ции проникающего дейст-
вия для бетонов 28

**Рахимбаев Ш.М., Оно-
приенко Н.Н.** Реологиче-
ские свойства цементного
теста с добавками водорас-
творимых полимеров 35

Алямовская И.С., Дариенко Н.Е., Михеенков М.А. Сравнительный анализ α - и β -полугидратов сульфата кальция	41
Зырянова В.Н., Лыткина Е.В., Бердов Г.И. Влияние состава затворителя на свойства композиционных магниальных вяжущих веществ	53
ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО	
Гахова Л.Н., Кузнецова Ю.А. Расчет напряжений в сталежелезобетонных турбинных водоводах методом граничных интегральных уравнений	59
САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА	
Бодров М.В. Эффективность применения вихревых воздухоохладителей в овощехранилищах	66
Халтурина Т.И., Чурбакова О.В., Курилина Т.А. Обработка и утилизация осадка кислотнo-щелочных сточных вод металлообрабатывающих предприятий	72
СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ	
Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Гладышев Г.В., Чубаров П.В. Камеры присоединенных объемов с жесткими и эластичными перегородками в дроссельных пневматических ударных механизмах	79
Семикопенко И.А., Воронов В.П., Пензев П.П. Дезинтегратор с эффективной камерой помола	83
НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ	
Сенющенкова И.М., Смирнова Т.Г. Геохимическое исследование снежного покрова городских территорий на сложном рельефе	89
Вольская Л.Н., Белолюбская С.В. Об особенностях сакрального зодчества в Якутии	97
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Адищев В.В., Кургузов В.Д., Роот В.В., Пляшкевич С.А., Савченко А.Ю. Многослойные теплоэффективные блоки в современном строительстве	104
Городков А.В., Волкова Н.В. Исследования и оценка визуальной среды средних и малых городов	113
Дмитриева Т.Л. Оптимизация ферм с дискретными параметрами	118

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 699.841

Т.А. БЕЛАШ, **В.С. КАЗАРНОВСКИЙ**

НЕТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ (отечественный и зарубежный опыт)

Дан обзор нетрадиционных методов сейсмозащиты зданий и сооружений, которые подразделяются на системы сейсмоизоляции и сейсмогашения. Рассмотрены их основные типы конструктивных решений, получившие широкое распространение в сейсмостойком строительстве в России и за рубежом. Показаны преимущества и недостатки тех или иных решений, даны рекомендации по их применению.

Ключевые слова: нетрадиционные (или специальные) методы сейсмозащиты, сейсмоизоляция, сейсмогашение, конструкции.

Как известно, в мировой практике сейсмостойкого строительства сложились два основных направления снижения сейсмического воздействия на здания и сооружения: за счет использования либо традиционных методов сейсмозащиты, либо нетрадиционных.

Традиционные методы получили широкое распространение в различных странах, в том числе и в России, в районах, подверженных сейсмической опасности, и являются общепризнанными. Они позволяют воспринимать сейсмические нагрузки за счет развития сечений конструкций, выбора рациональных объемно-планировочных и конструктивных систем, создания равнопрочных элементов несущих конструкций и т.п. Весь комплекс этих мероприятий направлен на повышение несущей способности конструкций, проектирование которых гарантирует сейсмостойкость зданий и сооружений в районах с сейсмичностью 7, 8 и 9 баллов.

Эффективность традиционных методов подтверждена практикой сейсмостойкого строительства и обоснована многочисленными расчетно-экспериментальными исследованиями. Традиционные методы сейсмозащиты приняты в нормах всех зарубежных стран и в России и рекомендованы для использования в сейсмических районах. Однако ввиду сложного и непредсказуемого характера поведения зданий и сооружений во время землетрясений наряду с традиционными методами все большее распространение в практике строительства получают нетрадиционные, или специальные, методы сейсмозащиты.

В соответствии со сложившейся терминологией в теории виброзащиты специальные методы могут подразделяться на активные (т.е. имеющие дополнительный источник энергии) и пассивные [1]. Предложения по активной сейсмозащите, включающей дополнительные источники энергии и элементы, регулирующие работу этих источников, в настоящее время получают широкое распространение, особенно в связи со строительством высотных зданий. Эта система позволяет достаточно эффективно управлять колебательным процессом не только при сейсмических колебаниях,

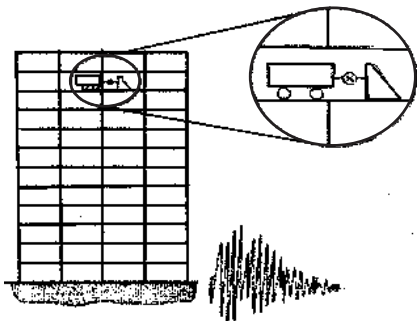


Рис. 1. Схема управляемого высотного сооружения

но и при ветровых воздействиях. Так, в работе [2] представлен анализ некоторых устройств активной системы сейсмозащиты, эффективно используемых в высотном строительстве ведущими японскими строительными компаниями. В частности, отмечается, что одним из возможных вариантов технической реализации динамического гашения колебаний может быть создание специального технического этажа с размещением на нем некоторой достаточно малой массы (по сравнению с общей массой сооружения), перемещаемой

в соответствии с законом управления в форме обратной связи по текущим показателям датчиков, что позволяет оказывать управляющее воздействие на данный этаж (рис. 1). К активным системам сейсмозащиты могут быть отнесены устройства, показанные на рис. 2 [3].

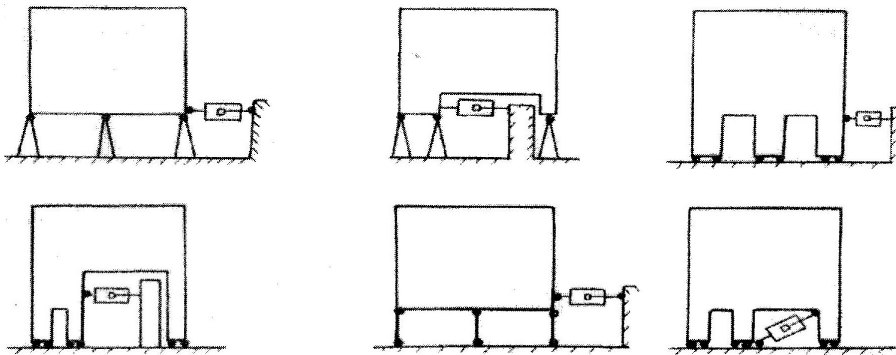


Рис. 2. Примеры изоляции сооружения при сейсмических колебаниях грунта посредством высокочастотного электрогидравлического сервомеханизма

Наибольшее распространение в практике сейсмостойкого строительства получили пассивные системы сейсмозащиты, которые подразделяются на сейсмоизоляцию и сейсмогашение. Основная идея устройства сейсмоизоляции состоит в использовании эффекта отстройки спектра частот собственных колебаний сооружения от спектра частот колебаний его основания при землетрясении с целью снижения инерционных сейсмических нагрузок. Эта цель достигается введением в конструкцию фундамента между сооружением и основанием податливых опор, характеристики жесткости (восстанавливающей способности) которых подбираются из условия обеспечения значительного превышения периода основного тона собственных колебаний сооружения над преобладающим периодом ускорения сейсмических колебаний.

Применение сейсмоизолирующих устройств было известно строителям с древнейших времен. В работе [4] можно найти упоминание о «мягких» поясах из камыша на глине, которые вводились в конструкцию фундаментов древних сооружений, о песчаных подушках, шарнирно-опертых гибких стойках среднеазиатских мечетей и др.

Наибольший интерес к идее применения сейсмоизоляции в сейсмостойком строительстве проявился в послевоенные годы. Было предложено огромное количество различных конструкций по реализации систем сейсмоизоляции. Все эти предложения можно условно разделить на две груп-

пы: стационарные и адаптивные системы сейсмозащиты. Стационарные системы сохраняют свои упругодемпфирующие характеристики в процессе колебаний, а адаптивные — необратимо изменяют свои параметры, приспособляясь к программе нагружения (сейсмическому воздействию). Стационарные системы сейсмоизоляции с восстанавливающей силой подразделяются на упругие и гравитационные. У первых восстанавливающей силой является сила упругости, а у второй — сила тяжести.

Примером стационарных систем сейсмоизоляции (при наличии возвращающей силы) являются здания с гибким нижним этажом, который может быть выполнен в виде каркасных стоек, упругих опор, свай и т.п. Один из возможных вариантов конструктивного исполнения гибкого этажа, предложенный японскими специалистами, представлен на рис. 3. Конструкция состоит из гибких опор, выполненных из пакета упругих стержней небольшого диаметра, размещенных между надземной и подземной частями здания.

Здания на резинометаллических опорных частях получили широкое распространение за рубежом: в Японии, США, Франции и других странах. Исследования сооружений на резинометаллических опорах свидетельствуют об их высокой надежности и работоспособности. Для повышения демпфирования они могут снабжаться свинцовым сердечником (рис. 4).

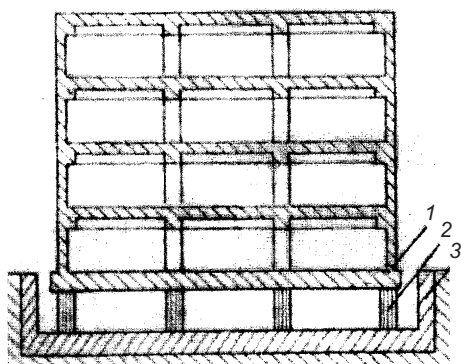


Рис. 3. Здание с гибким нижним этажом
1 — надземная часть здания; 2 — гибкие опорные элементы; 3 — подземная часть здания

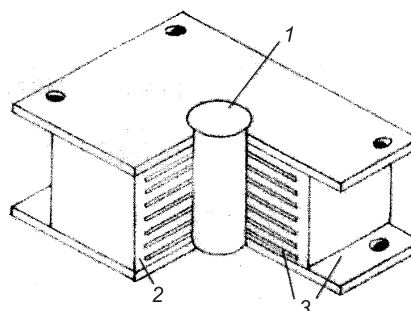


Рис. 4. Антисейсмическая опора
1 — свинцовый сердечник; 2 — резиновая опорная часть; 3 — металлические пластины

Сейсмоизолирующие фундаменты на кинематических опорах гравитационного типа были предложены различными авторами. Применение таких фундаментов характерно для России и стран СНГ. Наиболее известными в этой области являются кинематические опоры В.В. Назина, Ю.Д. Черепинского, А.В. Курзанова. Здания на таких опорах построены в Петропавловске-Камчатском, Навои, Южно-Сахалинске, Сочи и других городах. Примеры кинематических опор показаны на рис. 5 и 6.

За рубежом широкое распространение получили так называемые шаровые кинематические опоры (рис. 7), поставляемые ведущими мировыми фирмами. Сейчас шаровые опоры выпускаются различных форм и размеров, от нескольких килограммов до нескольких тонн. Одной из основных фирм, занимающихся изготовлением таких опор, является фирма Maurer Sohnes.

Пример стационарной системы сейсмоизоляции при отсутствии возвращающей силы иллюстрирует конструкция, показанная на рис. 8. Фундамент с сейсмоизолирующим скользящим поясом был разработан Л.Ш. Килимником, Л.А. Солдатовой, С.В. Поляковым и В.П. Чуднецовым. Конструкция защиты включает верхнюю обвязку и ростверк, между которыми введены фторопластовые пары, ограничители перемещений. При

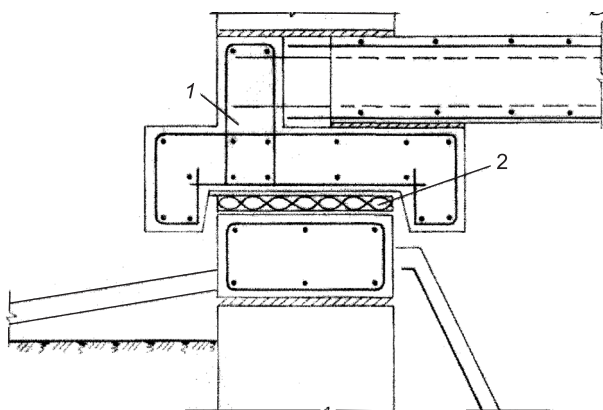


Рис. 5. Кинематический фундамент В.В. Назина
1 — надземная конструкция; 2 — эллипсоиды вращения

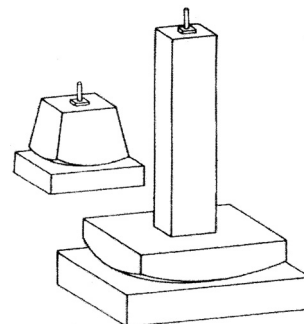


Рис. 6. Кинематический фундамент Ю.Д. Черепинского

действии на здание сейсмических нагрузок происходит относительное смещение между ростверком и верхней обвязкой, что снижает нагрузки до величины сил трения между листами фторопласта. Смещение здания по отношению к фундаменту ограничивается безопасными пределами.

Рассмотренные выше примеры сейсмоизоляции представляют собой системы, в которых динамические характеристики сохраняются в процессе землетрясения. Наряду с этими решениями в практике сейсмостойкого строительства получили распространение адаптивные системы, в которых динамические характеристики сооружения необратимо меняются в процессе землетрясения, «приспосабливаясь» к сейсмическому воздействию. Особенности работы такой системы были подробно исследованы в работах Я.М. Айзенберга, В.И. Смирнова и их учеников. Пример этой системы сейсмозащиты представлен на рис. 9. В нижней части здания между несущими стойками нижнего этажа установлены связевые панели, отключающиеся при интенсивных сейсмических воздействиях, когда в спектре воздействия преобладают периоды, равные или близкие к периоду свободных

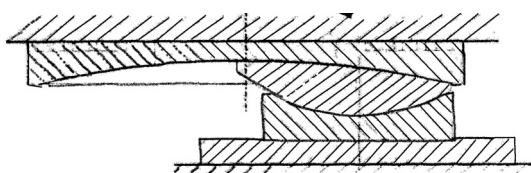


Рис. 7. Схематичный чертеж шаровой кинематической опоры

колебаний сооружения. После отключения панелей частота свободных колебаний падает, период колебаний увеличивается, происходит снижение сейсмической нагрузки.

При низкочастотном воздействии период собственных

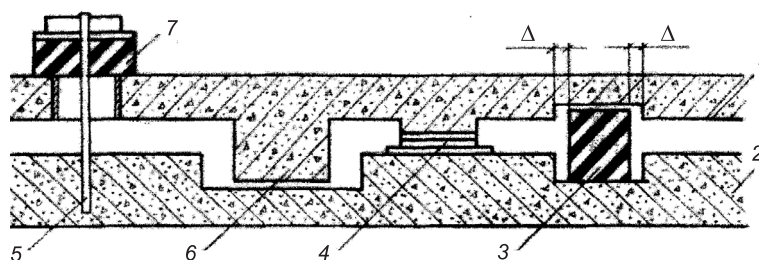


Рис. 8. Конструкция сейсмоизолирующего пояса

1, 2 — верхняя и нижняя фундаментные плиты; 3 — упругий ограничитель горизонтальных перемещений; 4 — скользящая опора; 5 — жесткий ограничитель горизонтальных перемещений; 6 — ограничитель вертикальных перемещений; 7 — вертикальный амортизатор; Δ — предельно допустимая величина смещения здания по отношению к фундаменту

колебаний со связевыми панелями значительно ниже величин преобладающих периодов колебаний грунта, поэтому резонансные явления проявляются слабо и связевые панели не разрушаются. Применение выключающихся связей наиболее эффективно в тех случаях, когда уверенно прогнозируется частотный состав ожидаемого сейсмического воздействия. В качестве недостатка необходимо отметить, что после разрушения выключающихся связей во время землетрясения необходимо их восстанавливать, что не всегда практически осуществимо.

Анализ конструктивных решений систем сейсмоизоляции показывает, что эффективность их применения во многом зависит от динамических характеристик самого сооружения: чем жестче сооружение, тем более высокий эффект сейсмоизоляции можно достичь. Кроме того, сейсмоизоляция наилучшим образом проявляется на скальных основаниях, минимальный эффект — на слабых грунтах. Следует отметить, что строгого критерия применения сейсмоизоляции не существует.

Принято считать, что сейсмоизоляцию целесообразно применять в случаях, когда низшая парциальная частота собственных горизонтальных колебаний изолируемого объекта, который жестко заделан в неподвижное основание, по крайней мере, в несколько раз превышает преобладающую частоту ускорения сейсмических колебаний основания.

При оценке работы сейсмоизолированных зданий и сооружений во время землетрясений следует иметь в виду, что сейсмическая опасность во многом зависит не только и даже не столько от ускорения колебаний основания этих сооружений, сколько от максимума его смещений при колебательных движениях во время землетрясения. Установлено, что в спектре большинства сильных землетрясений содержатся низкочастотные составляющие с большими амплитудами, которые могут представлять значительную опасность для систем сейсмоизоляции, угрожая прочности и устойчивости опорных элементов системы. Примерами, подтверждающими данное обстоятельство, являются многочисленные разрушения, имевшиеся в зданиях с гибким нижним этажом в г. Скопле, Бухаресте, Спитаке и других городах. Поэтому для обеспечения надежности поведения сейсмоизолированных зданий и сооружений необходимо, чтобы сейсмоизолирующие фундаменты обязательно содержали кроме систем опорных элементов систему специальных поглотителей энергии в виде демпфирующих устройств различного рода.

Все применяемые в практике сейсмостойкого строительства демпфирующие устройства по принципу работы можно подразделить на гидравлические и механические. Рассеивание энергии в гидравлических демпферах происходит за счет сил вязкого сопротивления, пропорциональных скорости, препятствующих перетеканию жидкости или вязкого вещества под давлением. Такие демпферы обеспечивают возможность получения значительно вязких сил сопротивления при относительно малых размерах, плавно включаются в работу и не вызывают паразитных высокочастотных колебаний. Однако относительная высокая стоимость и сложность эксплуатации ограничивают их массовое применение.

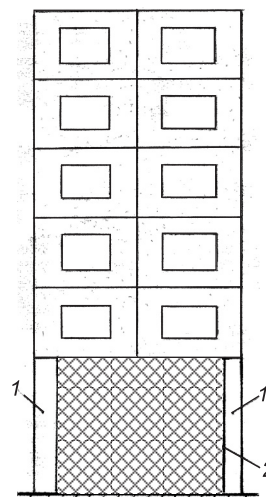


Рис. 9. Здание с выключающимися связями

1 — гибкие опорные элементы; 2 — связевые панели

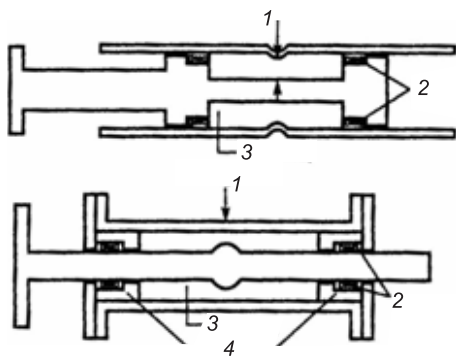


Рис. 10. Свинцовый демпфер
1 — отверстие; 2 — заглушка; 3 — свинец;
4 — втулка

В сейсмостойком строительстве применяются в основном два вида вязких демпферов: свинцовые и жидкостные.

Свинцовые демпферы были разработаны специалистами Новой Зеландии В. Робинсоном и Р.И. Скинером (1971 г.). Рассеивание энергии в таком демпфере происходит за счет преодоления сил пластической деформации свинца, возникающих при выдавливании его через экструзивное отверстие (рис. 10). Свинцовые демпферы имеют ряд преимуществ перед другими демпфирующими устройствами, за что и получают все более широкое распространение в сейсмостойком строительстве за рубежом, к таким преимуществам относятся:

- большой срок службы. Процесс деформации свинца осуществляется в герметично закрытом объеме, и потери пластической массы не происходит, что позволяет не менять демпфер после землетрясения;
- большое выделение температуры, способствующее быстрому восстановлению кристаллической структуры свинца и, соответственно, пластичности.

Несмотря на высокую эффективность работы вязких демпферов, наиболее удобны с точки зрения практической реализации и эксплуатации демпферы сухого трения. Поэтому они получили широкое распространение для целей сейсмогашения колебаний, особенно в качестве дополнительных средств защиты в системах сейсмоизоляции. Низкая стоимость, простота устройства, относительная стабильность динамических характеристик во времени — это основные качества демпферов сухого трения (ДСТ). Они реализованы в различных технических решениях с разнообразным сочетанием трущихся пар: металл по металлу, бетон по бетону или по сыпучим материалам, полимерные покрытия друг по другу или по металлу.

К основным недостаткам ДСТ необходимо отнести следующие:

- возникновение в результате скачкообразного изменения сил паразитных высокочастотных колебаний, в некоторых случаях существенно влияющих на общее поведение конструкции;
- возможность в зависимости от динамических параметров сейсмозащиты и спектрального состава землетрясения резкого увеличения амплитуды колебаний, что связано с сильной нелинейностью сейсмозащиты с ДСТ;
- зависимость сил трения в некоторых технических решениях ДСТ от передаваемого на них веса конструкции, что приводит к нестабильности их характеристик при динамическом воздействии;
- создание необходимых сил трения за счет высокого коэффициента трения либо значительного обжатия трущихся пар, в обоих случаях при-

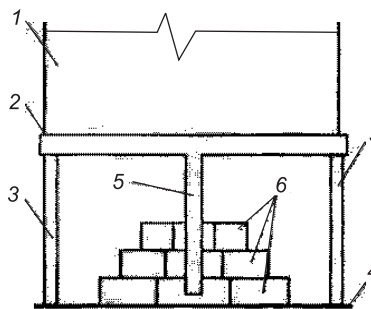


Рис. 11. Демпфирующее устройство
В.В. Назина

1 — надземная часть здания; 2 — верхняя фундаментная плита; 3 — гибкие опорные стойки; 4 — нижняя фундаментная плита; 5 — консольный стержень; 6 — система железобетонных колец

водящих к быстрому износу и соответственно нестабильности характеристик ДСТ, что заставляет тщательно относиться к подбору трущихся пар.

Примером ДСТ может быть устройство, предложенное В.В. Назиным, для высотных зданий с гибким нижним этажом (рис. 11).

Здесь консольный стержень, жестко закрепленный в верхней фундаментной плите и не доходящий до нижней фундаментной плиты, при больших колебаниях конструкции заставляет смещаться систему железобетонных колец и за счет возникающих при этом сил трения гасится энергия колебаний. В данном техническом решении регулирование демпфирующих характеристик осуществляется за счет подбора параметров колец. Еще одним достоинством этого демпфера можно назвать использование эффекта многокаскадности ДСТ.

Недостатками же данной конструкции демпфера являются невозможность прогнозирования сил трения при динамическом воздействии и большой расход железобетона.

В качестве ДСТ с регулируемыми параметрами можно назвать демпфирующее устройство, предложенное О.А. Савиновым, Т.А. Белаш и др. (рис. 12) [1]. Указанная конструкция включает верхнюю и нижнюю фундаментные плиты, соединенные посредством гибких в горизонтальном направлении вертикальных связей — сейсмоизолирующих опор. Плиты имеют расположенные напротив друг друга углубления, образующие пространство, в котором размещено фрикционное демпфирующее приспособление, снабженное подпружиненными упорами.

При величине сейсмических колебаний больше расчетного предельного значения происходит сдвиг верхней плиты относительно нижней. Силами

взаимодействия между плитами являются силы реакции сейсмоизоляции и силы трения массивного блока по фрикционному слою, при этом происходит интенсивное поглощение энергии сейсмических колебаний, расходуемой на преодоление силы трения в демпфере. В развитие предложенного технического решения ДСТ Ю.В. Гордеевым, А.А. Долгой и А.М. Уздиным предложено устройство [1], в котором фрикционные элементы выполнены из листового металла с фрикционным покрытием и подпружиненных упоров внутри коробчатого корпуса (рис. 13). Предлагаемый ДСТ, жестко закрепленный на нижней фундаментной плите, связан с верхней фундаментной плитой посредством

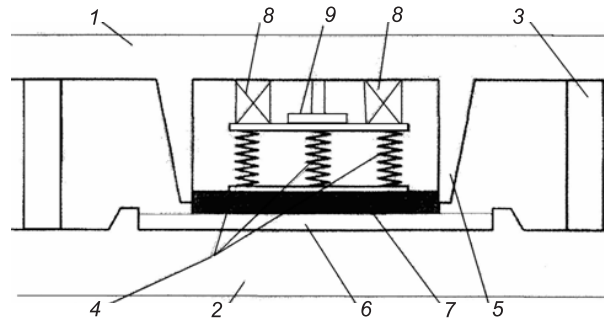


Рис. 12. Конструкция сейсмостойкого фундамента

1, 2 — верхняя и нижняя фундаментные плиты; 3 — опорный элемент; 4 — пружинное устройство; 5 — выступ верхней плиты; 6 — фрикционный слой из сыпучего материала; 7 — железобетонная плита; 8 — фиксаторы положения; 9 — место установки домкрата

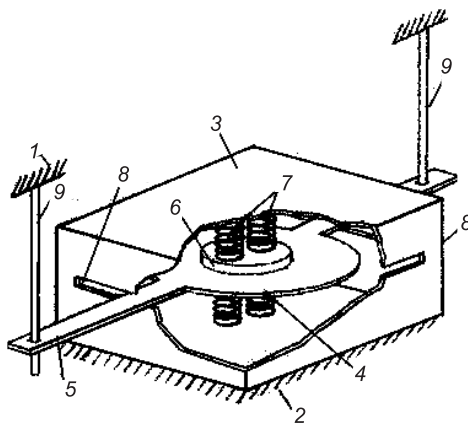


Рис. 13. Демпфер сухого трения

1, 2 — верхняя и нижняя фундаментные плиты; 3 — коробчатый корпус ДСТ; 4, 6 — фрикционная пара; 5 — консоль внутреннего фрикционного элемента; 7 — подпружиненные упоры; 8 — прорезы, обеспечивающие свободное перемещение элемента 7; 9 — стержневые элементы

стержневых элементов, не передающих вертикальных нагрузок, в результате чего ДСТ не передает распора от подпружиненных упоров на изолируемую конструкцию, а сам не воспринимает ее вес. Такая конструкция ДСТ позволяет использовать ее не только во вновь проектируемых, но также и в эксплуатируемых зданиях и сооружениях.

К регулируемым фрикционным демпфирующим устройствам следует также отнести фрикционно-подвижные соединения на высокопрочных болтах, в которых за счет овальных отверстий предусматриваются взаимные смещения соединяемых пластин при превышении предельных усилий в конструкции, задаваемых натяжением болтов. Фрикционно-подвижные соединения характеризуются высокой надежностью, компактностью, простотой изготовления, монтажа и ремонта после землетрясения.

Выводы. 1. В зарубежной и отечественной практике сейсмостойкого строительства все большее распространение получают нетрадиционные, или специальные, методы сейсмозащиты. Учитывая непредсказуемость возникновения землетрясений, сложный характер их воздействия на здания и сооружения, использование нетрадиционных методов достаточно эффективно и надежно для повышения сейсмостойкости строительных объектов. При этом появляется возможность существенно разнообразить выбор объемно-планировочных и композиционных решений зданий и сооружений.

2. Использование в практике сейсмостойкого строительства средств нетрадиционной сейсмозащиты необходимо осуществлять с помощью специалистов, которые должны уметь давать обоснованную оценку того или иного решения, включая расчетно-теоретические и экспериментальные исследования.

3. Активное внедрение нетрадиционных методов сейсмозащиты в практику сейсмостойкого строительства должно всегда сопровождаться расчетно-теоретическим, а в ряде случаев и экспериментальным обоснованием с учетом местных особенностей и характера проявления сейсмических воздействий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белаш, Т.А. Железнодорожные здания для районов с особыми природно-климатическими условиями и техногенными воздействиями : учебник для вузов [Текст] / Т.А. Белаш, А.М. Уздин. — М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2007. — 372 с.
2. Родионов, Б.Н. Защита высотных зданий и сооружений от ветровых и сейсмических воздействий [Текст] / Б.Н. Родионов // Строительные материалы, оборудование, технологии 21 века. — 2008. — Вып. 5. — С. 76–79.
3. Быховский, В.А. Сейсмостойкие сооружения за рубежом (по материалам VII междунар. конф. по сейсмостойкому строительству) [Текст] / В.А. Быховский, К.С. Завриев и др. — М. : Госстройиздат, 1968. — 420 с.
4. Кириков, Б.А. Избранные страницы истории сейсмостойкого строительства [Текст] / Б.А. Кириков. — М. : Мир, 1993. — 344 с.

БЕЛАШ Т.А., д-р техн. наук, проф.

Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения

КАЗАРНОВСКИЙ В.С., д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено после доработки 16.06.10

Belash T.A., doctor of technical sciences, professor, Saint-Petersburg State Railway Transport University, Russia

Kazarnovsky V.S., doctor of technical sciences, professor, Siberian State Railway Transport University, Novosibirsk, Russia

**NONCONVENTIONAL METHODS OF INCREASING
OF SEISMIC STABILITY OF BUILDINGS AND STRUCTURES
(home and foreign experience)**

The systems of existing nonconventional methods of seismoprotection of buildings and structures, subdivided into seismoisolation and seismodamping, are reviewed. The basic types of the structures widely used in earthquake engineering in Russia and abroad are described in detail. Their advantages and disadvantages are shown. Recommendations on their application are given.

Key words: nonconventional (or special) methods of seismoprotection, seismoisolation, seismodamping, structures.

REFERENCES

1. Belash, T.A. The railway buildings for the area with natural-climatic conditions and anthropogenic impact : The textbook for railway institute of higher education [Text] / T.A. Belash, A.M. Uzdin. — M. : GOU «Education-methodological centre for railway education», 2007. — 372 p.
2. Rodionov, B.N. The protection of the high-rise buildings from wind and seismic influence [Text] / B.N. Rodionov // Construction materials, methods and techniques of the XXI century. — 2008. — Vol. 5. — P. 76–79.
3. Bihovsky, V.A. The quakeproof the buildings abroad (VII international conference for quakeproof building) [Text] / V.A. Bihovsky, K.S. Zavriev et al. — M. : Gosstroyizdat, 1968. — 420 p.
4. Kirikov, B.A. The selected pages of the quakeproof building history [Text] / B.A. Kirikov. — M. : World, 1993. — 344 p.

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 539.4+539.376

А.Ф. НИКИТЕНКО, Б.С. РЕЗНИКОВ, И.В. КУЧЕРЕНКО

ПРЕДЕЛЬНОЕ РАВНОВЕСИЕ ТЕЛ В СЛУЧАЕ ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОБЩЕННОГО КРИТЕРИЯ ПРОЧНОСТИ*

Решена статически определяемая задача предельного равновесия тел (элементов конструкций) в случае плоского напряженного состояния, при этом использовался обобщенный критерий прочности и как частные случаи критерии Мизеса—Шлейхера и Мизеса.

К л ю ч е в ы е с л о в а: обобщенный критерий прочности, предельное равновесие, плоское напряженное состояние.

К плоским задачам принято относить такие [1, 2], решение которых зависит от трех компонент тензора напряжений σ_x , σ_y , σ_{xy} , трех компонент тензора скоростей деформации и двух компонент вектора скорости перемещений. Остальные компоненты не рассматриваются, даже если они отличны от нуля; их всегда можно найти после того, как задача уже решена.

Заслуживают внимания задачи, в которых граничные условия заданы только в напряжениях. В этом случае, добавляя к уравнениям равновесия

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

условие перехода материала тела в предельное состояние

$$\sigma_e(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}) = k, \quad (2)$$

получаем систему трех уравнений для определения трех неизвестных σ_x , σ_y , σ_{xy} , т.е. статически определяемую задачу предельного равновесия тела. Становится очевидным, что именно в таких задачах определяющие уравнения неупругого деформирования материала не оказывают влияния на предельное поле напряжений.

В (2) σ_e — эквивалентное напряжение, аналитическая аппроксимация которого представляет собой соответствующий критерий прочности; k — постоянная материала, оказывающая влияние на предельное поле напряжений и характеризующая особенности деформирования, в частности, k есть предел текучести материала на растяжение при жестко-пластическом деформировании или предел длительной прочности, если деформирование осуществляется во времени.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-08-00316).

Решение задачи (1), (2) ищем в виде [1, 2]

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_1 \cos^2 \psi + \sigma_2 \sin^2 \psi = p + \tau \cos 2\psi, \\ \sigma_y &= \sigma_1 \sin^2 \psi + \sigma_2 \cos^2 \psi = p - \tau \cos 2\psi, \\ \sigma_{xy} &= (\sigma_1 - \sigma_2) \sin \psi \cos \psi = \tau \sin 2\psi, \quad \sigma_1 \geq \sigma_2, \quad \sigma_z = \sigma_3.\end{aligned}\quad (3)$$

Здесь ψ — угол между первым главным направлением тензора напряжений и осью x прямоугольной декартовой системы координат x, y ;

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}, \quad \tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}, \quad (4)$$

где σ_1, σ_2 — главные компоненты тензора напряжений.

Подставляя (3) в уравнения равновесия (1), получим квазилинейную систему уравнений относительно частных производных функций $p(x, y)$ и $\psi(x, y)$:

$$\begin{aligned}(1 + \tau'_p \cos 2\psi) \frac{\partial p}{\partial x} + \tau'_p \sin 2\psi \frac{\partial p}{\partial y} - 2\tau \sin 2\psi \frac{\partial \psi}{\partial x} + 2\tau \cos 2\psi \frac{\partial \psi}{\partial y} &= 0, \\ \tau'_p \sin 2\psi \frac{\partial p}{\partial x} + (1 - \tau'_p \cos 2\psi) \frac{\partial p}{\partial y} + 2\tau \cos 2\psi \frac{\partial \psi}{\partial x} + 2\tau \sin 2\psi \frac{\partial \psi}{\partial y} &= 0,\end{aligned}\quad (5)$$

интегрирование которой осуществляется с использованием метода характеристик. После стандартных операций получаем, что направления характеристических линий определяются соотношениями [1, 2]

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\sin 2\psi \pm \sqrt{1 - \tau'^2_p}}{\cos 2\psi + \tau'_p}, \quad \tau'_p = \frac{d\tau}{dp}. \quad (6)$$

Очевидно, что система (5) будет гиперболической, если $|\tau'_p| < 1$; эллиптической, если $|\tau'_p| > 1$; параболической, если $|\tau'_p| = 1$; в задачах предельного равновесия механики деформируемого твердого тела встречаются все три случая [1, 3]. На тип системы уравнений (5) существенное влияние оказывает аппроксимация условия предельного состояния материала (2). Гиперболическая задача является достаточно простой, и для нее разработаны соответствующие методики решения. Данная работа посвящена определению области гиперболичности системы уравнений (5) при использовании в качестве σ_e (2) обобщенного критерия прочности [4]:

$$\sigma_e = \sqrt{S_2} f(\zeta) + \beta \sigma_0. \quad (7)$$

Здесь $S_2 = s_{ij} s_{ij} / 2$ — второй инвариант девиатора тензора напряжений;

$\sqrt{S_2} = \sigma_i / \sqrt{3}$, где σ_i — интенсивность напряжений;

$s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_0 \delta_{ij}$ — компоненты девиатора тензора напряжений;

$\sigma_0 = \sigma_{ij} \delta_{ij} / 3$, δ_{ij} — символ Кронекера, $i, j = 1, 2, 3$;

ζ — угол вида напряженного состояния, причем $\sin 3\zeta = \sqrt{3} S_3 / (2S_2^{3/2})$;

$S_3 = -s_{ik} s_{kj} s_{ji}$ — третий инвариант девиатора тензора напряжений;

$\beta \geq 0$ — коэффициент внутреннего трения.

В [4] для функции $f(\zeta)$ принята следующая аппроксимация:

$$f(\zeta) = [1 + \alpha (\sin 3\zeta)^\lambda]^{1/2\nu}, \quad (8)$$

там же изложена методика определения характеристик материала α, λ, ν и рассмотрены случаи перехода критерия (7) в уже известные.

Учитывая, что τ является функцией от p , определим эту функциональную связь из условия, что соотношения (3) тождественно удовлетворяют условию предельного состояния (2). С этой целью главные напряжения, представленные в тригонометрической форме,

$$\sigma_1 = \frac{2}{3}\sigma_i \sin\left(\frac{\pi}{3} - \zeta\right) + \sigma_0, \quad \sigma_2 = \frac{2}{3}\sigma_i \sin\zeta + \sigma_0, \quad (9)$$

$$\sigma_3 = -\frac{2}{3}\sigma_i \sin\left(\frac{\pi}{3} + \zeta\right) + \sigma_0, \quad \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3, \quad -\frac{\pi}{6} \leq \zeta \leq \frac{\pi}{3}$$

подставим в (4). Получаем, что $p = \frac{1}{3}\sigma_i \sin\left(\frac{\pi}{3} + \zeta\right) + \sigma_0$,

$\tau = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_i \cos\left(\frac{\pi}{3} + \zeta\right)$. В случае плоского напряженного состояния $\sigma_3 = 0$.

Из (9) следует, что $\sigma_0 = \frac{2}{3}\sigma_i \sin\left(\frac{\pi}{3} + \zeta\right)$. С учетом этого имеем

$$p = \sigma_i \sin\left(\frac{\pi}{3} + \zeta\right), \quad \tau = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_i \cos\left(\frac{\pi}{3} + \zeta\right), \quad \sigma_0 = \frac{2}{3}p. \quad (10)$$

Подставим в условие предельного состояния (7) значение $\sigma_0 = 2p/3$ согласно (10) и выразим σ_i . Получаем

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{3}k}{f(\zeta)F(\zeta)}, \quad (11)$$

где

$$F(\zeta) = 1 + \frac{2}{\sqrt{3}}\bar{\beta} \sin\left(\frac{\pi}{3} + \zeta\right), \quad \bar{\beta} = \frac{\beta}{f(\zeta)}. \quad (12)$$

Окончательно:

$$p = \frac{\sqrt{3}k \sin(\pi/3 + \zeta)}{f(\zeta)F(\zeta)}, \quad \tau = \frac{k \cos(\pi/3 + \zeta)}{f(\zeta)F(\zeta)}, \quad \sigma_0 = \frac{2}{3}p. \quad (13)$$

Главные напряжения (9) с учетом (11)–(13) примут вид

$$\sigma_1 = \frac{2k \cos\zeta}{f(\zeta)F(\zeta)}, \quad \sigma_2 = \frac{2k \cos(\pi/3 - \zeta)}{f(\zeta)F(\zeta)}, \quad \sigma_3 = 0. \quad (14)$$

Следствием выполненных выше операций является то, что главные напряжения (14) тождественно удовлетворяют условию предельного состояния (2) и представляют собой параметрические уравнения предельной кривой в координатах σ_1, σ_2 или (с использованием (13)) в переменных p, τ :

$$p = \frac{\sqrt{3}k \sin(\pi/3 + \zeta)}{f(\zeta)F(\zeta)}, \quad \tau = \frac{p}{\sqrt{3}} \operatorname{ctg}(\pi/3 - \zeta). \quad (15)$$

Используя (15), вычислим τ'_p . Получаем

$$\tau'_p = -\frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\sin(\pi/3 + \zeta)[f(\zeta)F(\zeta)] + \cos(\pi/3 + \zeta)[f(\zeta)F(\zeta)]'_\zeta}{\cos(\pi/3 + \zeta)[f(\zeta)F(\zeta)] - \sin(\pi/3 + \zeta)[f(\zeta)F(\zeta)]'_\zeta}. \quad (16)$$

Знаменатель функции (16) при некоторых значениях ζ равен нулю, функция при этих значениях ζ не определена, что создает некоторые неудобства при дальнейшем решении соответствующих задач. Поэтому преобразуем исходную систему уравнений (5), перейдя от τ'_p к τ'_ζ , от $\partial p/\partial x$, $\partial p/\partial y$ к $\partial \zeta/\partial x$, $\partial \zeta/\partial y$. После простейших операций будем иметь

$$\begin{aligned} A_1 \frac{\partial \zeta}{\partial x} + B_1 \frac{\partial \zeta}{\partial y} + C_1 \frac{\partial \psi}{\partial x} + D_1 \frac{\partial \psi}{\partial y} &= 0, \\ A_2 \frac{\partial \zeta}{\partial x} + B_2 \frac{\partial \zeta}{\partial y} + C_2 \frac{\partial \psi}{\partial x} + D_2 \frac{\partial \psi}{\partial y} &= 0. \end{aligned} \quad (17)$$

В (17) введены обозначения:

$$A_1 = p'_\zeta + \tau'_\zeta \cos 2\psi, \quad B_1 = \tau'_\zeta \sin 2\psi, \quad C_1 = -2\tau \sin 2\psi, \quad D_1 = 2\tau \cos 2\psi, \quad (18)$$

$$A_2 = \tau'_\zeta \sin 2\psi, \quad B_2 = p'_\zeta - \tau'_\zeta \cos 2\psi, \quad C_2 = 2\tau \cos 2\psi, \quad D_2 = 2\tau \sin 2\psi;$$

$$p'_\zeta = \frac{\partial p}{\partial \zeta} = \lambda_1 \sqrt{3} \{ \cos(\pi/3 + \zeta)[f(\zeta)F(\zeta)] - \sin(\pi/3 + \zeta)[f(\zeta)F(\zeta)]'_\zeta \}; \quad (19)$$

$$\tau'_\zeta = \frac{\partial \tau}{\partial \zeta} = -\lambda_1 \{ \sin(\pi/3 + \zeta)[f(\zeta)F(\zeta)] + \cos(\pi/3 + \zeta)[f(\zeta)F(\zeta)]'_\zeta \}. \quad (20)$$

Множитель λ_1 в (19) и (20) равен

$$\lambda_1 = \frac{k}{[f(\zeta)F(\zeta)]^2}. \quad (21)$$

Следуя стандартному методу [2], для системы уравнений (17) получаем, что направления характеристических линий определяются как

$$\frac{dy}{dx} = \frac{p'_\zeta \sin 2\psi \pm \sqrt{(p'_\zeta)^2 - (\tau'_\zeta)^2}}{\tau'_\zeta + p'_\zeta \cos 2\psi}. \quad (22)$$

Отметим, что (22) переходит в (6), если учесть, что $\tau'_\zeta = \tau'_p p'_\zeta$.

Теперь очевидно из (22), что система (17) будет гиперболической, если $\delta = [(p'_\zeta)^2 - (\tau'_\zeta)^2] > 0$. В качестве иллюстрации на рис. 1 сплошной линией представлен график функции $\delta(\zeta)$ при $0 \leq \zeta \leq 2\pi$. Эта функция определена при всех ζ и является более удобной для дальнейшего исследования по сравнению с функцией τ'_p (16), которая показана штриховой линией. Согласно проведенным расчетам, интервалы AB , CD являются областями гиперболичности системы (17). Очевидно, при обобщенном критерии предельного состояния значительно удобнее для исследования типа системы (5) или эквивалентной ей (17) использовать функцию $\delta(\zeta)$.

При построении графиков функций на рис. 1 были приняты следующие значения характеристик материала: $\lambda = 1$, $\nu = 2$, $\alpha = 0,0275$,

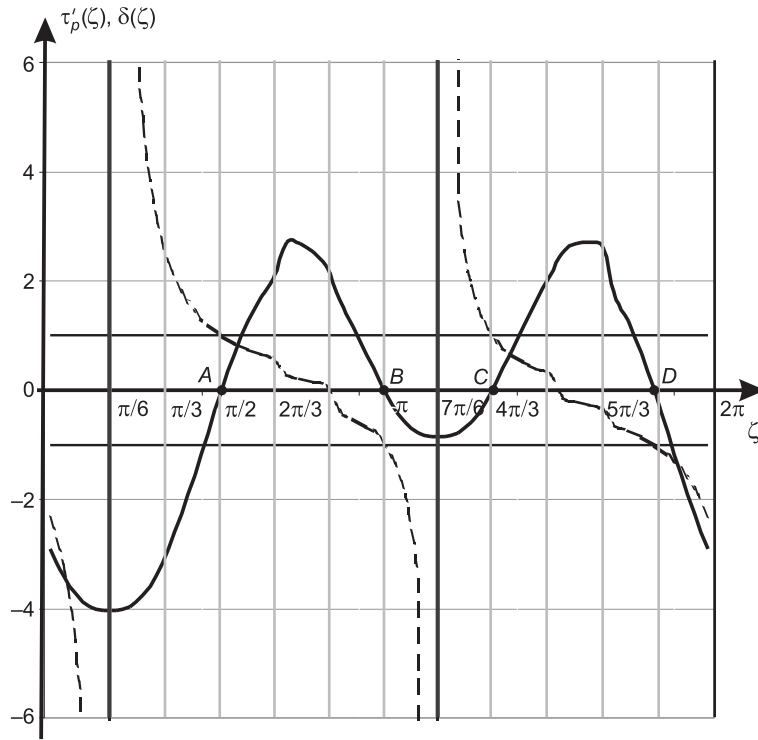


Рис. 1. Графики функций
 $\tau'_p(\zeta)$ — штриховая линия, $\delta(\zeta)$ — сплошная линия

$\bar{\beta} = \sqrt{3}/2$ при $-\pi/3 \leq \zeta \leq 2\pi/3$, $\bar{\beta} = 0,5494$ при $2\pi/3 \leq \zeta \leq 5\pi/6$ и $3\pi/2 \leq \zeta \leq 5\pi/3$, $\bar{\beta} = 0,0565$ при $5\pi/6 \leq \zeta \leq 3\pi/2$. Эти характеристики соответствуют стали Р6М5 и получены на основании методики построения предельной кривой прочности в случае плоского напряженного состояния [4, 5].

В системе координат τ , p , повернутой относительно исходной σ_1 , σ_2 на угол $\pi/4$ по ходу часовой стрелки, уравнения

$$\frac{(p + \bar{p}_0)^2}{\bar{a}^2} + \frac{\tau^2}{\bar{b}^2} = 1,$$

$$a = \frac{\sqrt{3}kf(\zeta)}{f^2 - \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\beta\right)^2}, \quad b = \frac{k}{\left[f^2 - \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\beta\right)^2\right]^{1/2}}, \quad p_0 = \frac{2k\bar{\beta}}{f^2 - \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\beta\right)^2}, \quad (23)$$

$$\bar{a} = af(\zeta), \quad \bar{b} = bf(\zeta), \quad \bar{p}_0 = p_0f(\zeta), \quad \bar{\beta} = \beta/f(\zeta)$$

представляют собой семейство кривых второго порядка, параметром которого является угол вида напряженного состояния.

Очевидно, что уравнения (23) определяют семейство эллипсов, если $\bar{\beta} < \sqrt{3}/2$, семейство парабол, если $\bar{\beta} = \sqrt{3}/2$, и гипербол, если $\bar{\beta} > \sqrt{3}/2$. На рис. 2 представлена плоскость напряжений σ_1 , σ_2 , которую в зависимости от значений и знаков главных напряжений можно разбить на восемь областей (римские цифры). На лучах указаны значения угла вида напряженного состояния ζ и схематично сплошной линией показана предельная кри-

вая. При построении этой кривой в [5] предложено плоскость напряжений разбить на две полуплоскости: $\sigma_0 > 0$ (области I–IV, причем в областях I, IV — напряжения разных знаков, в областях II, III — одного знака) и $\sigma_0 < 0$ (области V–VIII, причем в областях V, VIII — напряжения разных знаков, в областях VI, VII — одного знака). Границей этих полуплоскостей является прямая K_1K_2 , уравнение которой $\sigma_0 = -\sigma_1 + \sigma_2 = 0$. В каждой из этих областей определяются α , $\bar{\beta}$, k по изложенной в [4, 5] методике. Неоспоримым остается факт возможности выбора расчетной кривой (парабола, эллипс, гипербола) в зависимости от ее соответствия экспериментальной предельной кривой в областях II, III, где напряжения положительны, в областях I, IV, где напряжения разных знаков, или же в целом в полуплоскости $\sigma_0 > 0$ (области I–IV). В зависимости от выбора расчетной кривой меняется константа $\bar{\beta}$. На полуплоскости $\sigma_0 < 0$ предельную кривую в целом можно аппроксимировать частями эллипса, гиперболы или параболы (области V, VIII), частями эллипса (области VI, VII).

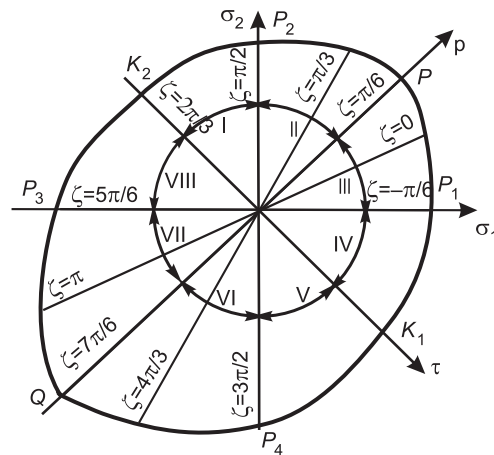


Рис. 2. Геометрическая интерпретация предельной кривой прочности

В соответствии с вышеизложенным на рис. 3, а представлена расчетная предельная кривая для стали Р6М5, полученная с использованием обобщенного критерия прочности. Участок K_1DAK_2 аппроксимирован параболой, при этом $\bar{\beta} = \sqrt{3}/2$; участки K_2P_3 и K_1P_4 , для которых согласно [4, 5] $\bar{\beta} = 0,5494$, аппроксимированы частями эллипса; участок P_3BCP_4 , для которого $\bar{\beta} = 0,0565$, аппроксимирован частью эллипса. Жирными линиями выделены области AB и CD , для которых $\delta(\zeta) > 0$ (см. рис. 1), характеристики (22) действительны, а следовательно, система уравнений (17) является гиперболической. Заметим, что участок K_1DAK_2 согласно

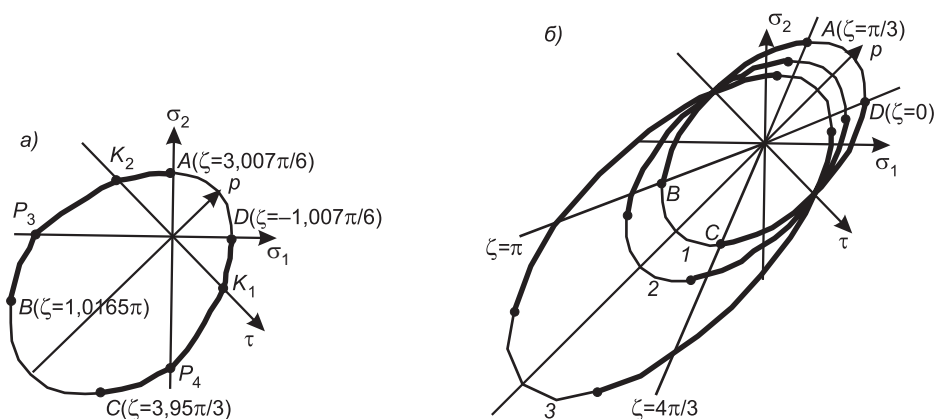


Рис. 3. Расчетные предельные кривые для стали Р6М5

а — в случае использования обобщенного критерия прочности, AB и CD — области гиперболичности системы (17); б — в случае использования критериев Мизеса и Мизеса—Шлейхера при $\lambda = 1$, $\nu = 2$, $\alpha = 0$: 1 — эллипс Мизеса, $\bar{\beta} = 0$, AB и CD — области гиперболичности; 2 — эллипс Мизеса—Шлейхера, $\bar{\beta} = 0,25$; 3 — эллипс Мизеса—Шлейхера, $\bar{\beta} = 0,5494$;

жирными линиями показаны области гиперболичности

[4, 5] может быть аппроксимирован эллипсом или гиперболой и в зависимости от этого границы областей гиперболичности будут изменяться.

Если $f(\zeta) = 1$, что равносильно $\alpha = 0$ в (8), обобщенный критерий прочности (7) вырождается в критерий Мизеса—Шлейхера. В этом случае $\bar{\beta} = \bar{\beta}$, $F(\zeta) = 1 + \frac{2}{\sqrt{3}}\bar{\beta}\sin(\pi/3 + \zeta)$ согласно (12), $f'(\zeta) = 0$, $F'(\zeta) = (2\bar{\beta}\cos(\pi/3 + \zeta))/\sqrt{3}$, а в соответствии с (19) и (20) $p'_\zeta = \lambda\sqrt{3}\cos(\pi/3 + \zeta)$, $\tau'_\zeta = -\lambda[\sin(\pi/3 + \zeta) + 2\bar{\beta}/\sqrt{3}]$. Определение области гиперболичности системы уравнений (17) из условия $\delta(\zeta) = [(p'_\zeta)^2 - (\tau'_\zeta)^2] > 0$ сводится к решению неравенства

$$\sin^2(\pi/3 + \zeta) + \frac{\bar{\beta}}{\sqrt{3}}\sin(\pi/3 + \zeta) + \left(\frac{\bar{\beta}^2}{3} - \frac{3}{4}\right) < 0. \quad (24)$$

Это решение имеет вид

$$\begin{cases} -\pi/3 + \arcsin\alpha_1 < \zeta < -\pi/3 + \arcsin\alpha_2, \\ 2\pi/3 - \arcsin\alpha_2 < \zeta < 2\pi/3 - \arcsin\alpha_1, \end{cases} \quad (25)$$

где $\alpha_1 = -\bar{\beta}/(2\sqrt{3}) - \sqrt{3 - \bar{\beta}^2}/2$, $\alpha_2 = -\bar{\beta}/(2\sqrt{3}) + \sqrt{3 - \bar{\beta}^2}/2$.

Неравенства (25) позволяют исследовать зависимость областей гиперболичности от характеристики материала $\bar{\beta}$. На рис. 3, б показаны предельные кривые Мизеса—Шлейхера при различных значениях $\bar{\beta}$ и $\lambda = 1$, $\nu = 2$, $\alpha = 0$; жирными линиями выделены области гиперболичности.

В случае $\bar{\beta} = 0$ и $\alpha = 0$ критерий (7) вырождается в критерий Мизеса, предельной кривой будет эллипс. Установление области гиперболичности системы уравнений (17) сводится к решению неравенства

$$\sin^2(\pi/3 + \zeta) - \frac{3}{4} < 0, \quad (26)$$

которое следует из (24), (25) при $\bar{\beta} = 0$ и совпадает с уже известным результатом [2]. На рис. 3, б приведен этот эллипс, жирными линиями отмечены области, в которых система уравнений (17) является гиперболической.

Перейдем к установлению соотношений между искомыми функциями на характеристиках. Вспомним предварительно, что первое главное направление, т.е. ось σ_1 , является биссектрисой угла между характеристическими линиями ξ и η . Если совместим ось x с касательной к характеристике ξ , то $dy/dx = 0$ и из (22) на характеристике ξ получаем

$$p'_\zeta \sin 2\psi - \sqrt{(p'_\zeta)^2 - (\tau'_\zeta)^2} = 0, \quad (27)$$

на характеристике η —

$$p'_\zeta \sin 2\psi + \sqrt{(p'_\zeta)^2 - (\tau'_\zeta)^2} = 0. \quad (28)$$

Из этих двух соотношений очевидно, что

$$\tau'_\zeta - p'_\zeta \cos 2\psi = 0. \quad (29)$$

Теперь, следуя [2], умножим первое уравнение (17) на $\sin 2\psi$, второе — на $\cos 2\psi$ и вычтем из первого уравнения второе. Получим

$$(p'_\zeta \sin 2\psi) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + (-p'_\zeta \cos 2\psi + \tau'_\zeta) \frac{\partial \zeta}{\partial y} - 2\tau \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0. \quad (30)$$

Второе слагаемое в (30) согласно (29) равно нулю. Используя (27) и (28), заменим выражение $p'_\zeta \sin 2\psi$ в первом слагаемом. Получим на характеристике ξ

$$\frac{1}{2\tau(\zeta)} \sqrt{(p'_\zeta)^2 - (\tau'_\zeta)^2} d\zeta - d\psi = 0, \quad (31)$$

на характеристике η

$$\frac{1}{2\tau(\zeta)} \sqrt{(p'_\zeta)^2 - (\tau'_\zeta)^2} d\zeta + d\psi = 0. \quad (32)$$

Обозначая

$$G(\zeta) = \frac{1}{2} \int_{\zeta_0}^{\zeta} \frac{\sqrt{(p'_\zeta)^2 - (\tau'_\zeta)^2}}{\tau(\zeta)} d\zeta, \quad (33)$$

из (31) и (32) окончательно имеем соотношения

$$G(\zeta) \mp \psi = \text{const}, \quad (34)$$

где знак минус соответствует характеристике ξ , плюс — характеристике η .

Рассмотрим ряд частных случаев. Действительно, если $f(\zeta) = 1$, то обобщенный критерий (7) переходит в критерий Мизеса—Шлейхера. В этом случае, учитывая (13), (21) и (24), из (33) получаем

$$G(\zeta) = \frac{1}{2} \int_{\zeta_0}^{\zeta} \frac{\sqrt{\left(3 - \frac{4}{3} \bar{\beta}^2\right) - \frac{4\bar{\beta}}{\sqrt{3}} \sin\left(\frac{\pi}{3} + \zeta\right) - 4 \sin^2\left(\frac{\pi}{3} + \zeta\right)}}{\left[1 + \frac{2\bar{\beta}}{\sqrt{3}} \sin\left(\frac{\pi}{3} + \zeta\right)\right] \cos\left(\frac{\pi}{3} + \zeta\right)} d\zeta. \quad (35)$$

Если $\bar{\beta} = 0$, то критерий Мизеса—Шлейхера переходит в критерий Мизеса, из (35) следует

$$G(\zeta) = \frac{1}{2} \int_{\zeta_0}^{\zeta} \frac{\sqrt{3 - 4 \sin^2\left(\frac{\pi}{3} + \zeta\right)}}{\cos\left(\frac{\pi}{3} + \zeta\right)} d\zeta, \quad (36)$$

что совпадает с уже известными результатами [1, 2].

В заключение отметим, что полученные с использованием обобщенного критерия прочности (7) результаты, представленные на рис. 1–3, совместно с (34) рекомендуется использовать в расчетной практике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. И в л е в, Д.Д. Теория идеальной пластичности [Текст] / Д.Д. Ивлев. — М. : Наука, 1966. — 232 с.

2. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела [Текст] / Ю.Н. Работнов. — М. : Наука, 1988. — 712 с.
3. Буренин, А.А. Плоское напряженное состояние в условиях нелинейной неустановившейся ползучести [Текст] / А.А. Буренин, В.М. Ярушина // Дальневост. матем. журн. — 2002. — Т. 3, № 1. — С. 64–78.
4. Никитенко, А.Ф. Единый (обобщенный) критерий прочности материалов. Сообщение 1 [Текст] / А.Ф. Никитенко, А.М. Коврижных, И.В. Кучеренко // Изв. вузов. Строительство. — 2006. — № 11–12. — С. 4–11.
5. Никитенко, А.Ф. Единый (обобщенный) критерий прочности материалов. Сообщение 2 [Текст] / А.Ф. Никитенко, А.М. Коврижных, И.В. Кучеренко // Изв. вузов. Строительство. — 2007. — № 1. — С. 33–38.

*НИКИТЕНКО А.Ф., д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: nikitenko@hydro.nsc.ru
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
РЕЗНИКОВ Б.С., д-р техн. наук; E-mail: kimt@ngs.ru
Новосибирский государственный технический университет
КУЧЕРЕНКО И.В., канд. техн. наук; E-mail: kucher@ngs.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Получено 12.05.10

Nikitenko A.F., doctor of physical and mathematical sciences, professor; E-mail: nikitenko@hydro.nsc.ru, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Russia
Reznikov B.S., candidate of technical sciences; E-mail: kimt@ngs.ru, Novosibirsk State Technical University, Russia
Kucherenko I.V., candidate of technical sciences; E-mail: kucher@ngs.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

LIMITING EQUILIBRIUM OF BODIES UNDER FLAT STRESS STATE USING GENERALIZED STRENGTH CRITERION

The statically determinate problem of limiting equilibrium of bodies (construction elements) in case of the flat stress state is decided. Thus the generalized strength criterion has been used, and as special cases, von Mises—Schleicher criterion and von Mises criterion.

Key words: generalized strength criterion, limiting equilibrium, flat stress state.

REFERENCES

1. Ivlev, D.D. The theory of ideal plasticity [Text] / D.D. Ivlev. — M. : Science, 1966. — 232 p.
2. Rabotnov, Yu.N. The mechanics of a deformable firm body [Text] / Yu.N. Rabotnov. — M. : Science, 1988. — 712 p.
3. Burenin, A.A. The flat stress state in nonlinear unsteady creep conditions [Text] / A.A. Burenin, V.M. Yarushina // Far East Math. J. — 2002. — Vol. 3, N 1. — P. 64–78.
4. Nikitenko, A.F. A single (generalized) criterion of materials strength (information 1) [Text] / A.F. Nikitenko, A.M. Kovrizhnykh, I.V. Kucherenko // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2006. — N 11–12. — P. 4–11.
5. Nikitenko, A.F. A single (generalized) criterion of materials strength (information 1) [Text] / A.F. Nikitenko, A.M. Kovrizhnykh, I.V. Kucherenko // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2007. — N 1. — P. 33–38.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.175.001

**В.П. СЕЛЯЕВ, Л.И. КУПРИЯШКИНА, О.Ю. КОРОВИНА,
Е.Л. КЕЧУТКИНА****ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ БОЗЕ–ЭЙНШТЕЙНА
ДЛЯ АНАЛИЗА ВРЕМЕННОЙ ЗАВИСИМОСТИ
ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ АГРЕССИВНЫХ СРЕД,
ТЕМПЕРАТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Теоретически получена временная зависимость прочности композиционных материалов, учитывающая совместное действие агрессивных сред, температуры и механических напряжений, показана возможность применения полученной зависимости для анализа химического взаимодействия среды и материала.

Ключевые слова: прочность, композит, агрессивная среда.

Временная зависимость прочности полимеров, обусловленная кинетической природой термофлуктуационного механизма разрушения, наиболее полно и систематически исследована С.Н. Журковым [1, 2].

На основании анализа экспериментальных данных температурно-временная зависимость прочности, по Журкову, представлена в виде функции:

$$\tau = \tau_0 \exp \left\{ \frac{U_0 - \gamma \sigma}{kT} \right\}, \quad (1)$$

где τ — долговечность (время разрушения) материала;

τ_0 — постоянная, численно близкая к периоду тепловых колебаний атомов;

U_0 — начальный активационный барьер процесса разрушения;

γ — постоянная, зависящая от структуры и природы материала;

σ — напряжение в материале;

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура.

Эмпирическую формулу Журкова можно получить теоретически, предполагая, что в материале распределение частиц по энергетическим состояниям описывается статистикой Больцмана, которая имеет вид

$$P(E) = \frac{N_i}{N} = A(T) \exp \left(-\frac{E_i}{RT} \right), \quad (2)$$

где N_i / N — доля частиц с энергией E_i (вероятность пребывания частицы в состоянии с энергией E_i);

R — универсальная газовая постоянная ($R = kN$);

$A(T)$ — функция температуры и других физических параметров системы, характеризующая ее состояние [1–3].

Признано, что зависимость (1) имеет фундаментальное значение, так как экспериментально соблюдается для самых разнообразных материалов (металлов, неорганических и органических стекол, кристаллических ориентированных полимерных материалов и волокон, цементных композитов) в широком интервале времени и температуры. При $\sigma = 0$ уравнение (1), по мнению В.Н. Манина, А.Н. Громова [3], теряет смысл. Этот недостаток формулы (1) обусловлен предположением, что временной характер процесса разрушения зависит только от температуры и напряжения [3]. Однако на практике мы часто наблюдаем случаи разрушения материала под действием агрессивных сред при нулевом уровне напряжений. Вместе с тем экспериментально установлено, что временная зависимость прочности наблюдается и при действии на полимеры жидких агрессивных сред, но выражена она слабее [3, 4].

В работе сделана попытка теоретически получить функцию временной зависимости прочности при совместном действии температур, агрессивных сред и механических напряжений. Для этого предположим, что в материале распределение частиц по энергетическим состояниям описывается статистикой Бозе–Эйнштейна¹, которая имеет вид

$$\bar{N}_i = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_i - \mu}{kT}\right) + \delta}, \quad (3)$$

где \bar{N}_i — среднее число частиц в данном квантовом состоянии с энергией E_i ; $\delta = \pm 1$; μ — химический потенциал как характеристика системы, введенная Гиббсом (1875), определяет работу образования одного моля данного компонента при заданных значениях давления и температуры.

Если рассматривать химическую энергию e_x как произведение интенсивности свойства (μ) на величину фактора емкости (экстенсивности) (dn или dc), то будем иметь $e_x = \mu dc$ (если реагирующие вещества представлены твердой фазой или жидкостью).

Если предположить, что $\delta \ll \exp\left(\frac{E_i - \mu}{kT}\right)$, то из (3) получаем выражение, близкое к статистике Больцмана (2), в следующем виде:

$$P(E) = \frac{N_i}{N} = \exp\left(-\frac{E_i - e_x}{RT}\right). \quad (4)$$

Принципиальное отличие формулы (2) от функции (4) заключается в том, что в первом случае разрушение рассматривается как процесс, развивающийся во времени, обусловленный тепловыми флуктуациями частиц и действием механических напряжений. Во втором случае учитывается влияние на этот процесс энергии химических связей. При действии агрессивных сред процесс разрушения сопровождается ослаблением, неравномерным по объему химических связей. Именно этим можно объяснить более слабое проявление температурно-временной зависимости при действии агрессивных сред.

¹ Меламедов И.М. Физические основы надежности. Л.: Энергия, 1970. 152 с.

Представим разрушение материала как постепенный процесс накопления дефектов, повреждений во времени, активизируемый действием на материал тепловой, механической, химической энергий. Под действием механической, химической энергий снижается величина начального активационного барьера.

Рассмотрим процесс развития дефектов в структурном элементе под действием постоянных во времени напряжений и агрессивных сред. В соответствии с моделью, предложенной в работе В.И. Соломатова², обозначим через P вероятность того, что в некоторой связи, соединяющей две частицы, флуктуирующие с частотой ω , накоплена энергия, необходимая для ее разрыва. Тогда вероятность разрыва связи за промежуток времени dt будет равна $P\omega dt$, где $0 \leq P\omega dt \leq 1$. Вероятность того, что за время t обрыва связи не произойдет, определяется выражением $(1 - P)^{\omega t}$. Если N_0 — число исходных нагруженных связей, то число целых связей, сохранившихся к моменту времени t , будет равно $N(t) = N_0 (1 - P)^{\omega t}$.

Число связей, разорванных в течение интервала времени $t, t + \Delta t$, определяется из уравнения

$$-dN = N_0 (1 - P)^{\omega t} P \omega dt. \quad (5)$$

Интегрируя уравнение, получаем выражение, описывающее изменение числа целых связей во времени:

$$\frac{N(t)}{N(0)} = \frac{P (1 - P)^{\omega t}}{\ln(1 - P)} = -\frac{P \exp\{\ln(1 - P)\omega t\}}{\ln(1 - P)}.$$

Для очень малых значений P ($0 \leq P \leq 0,2$) можно принять, что $\ln(1 - P) = -P$. Тогда полученная формула примет вид

$$N(t) / N_0 = \exp(-P\omega t). \quad (6)$$

Так как $0 \leq P\omega t \leq 1$, то очевидно, что время до разрушения связи τ можно найти из условия $P\omega\tau = 1$. Тогда

$$\tau = [P\omega]^{-1} = \tau_0 P^{-1}, \quad (7)$$

где $\tau_0 = 1/\omega$ — период колебаний частиц.

Если вероятность P нахождения частицы в данном энергетическом состоянии определить статистикой Бозе—Эйнштейна (4), то получим выражение

$$\tau = \tau_0 \exp\left\{\frac{E_i - e_x}{RT}\right\}. \quad (8)$$

Предполагая, что разрыв связей (отрыв частиц друг от друга) происходит при достижении расстояния δ_k между их центрами³ и уровне напряжений σ , то работа e_m силы f , затраченной на разрыв связи, равна $e_m = f\delta_k$. Усилие f определяется с учетом площади связей $f = A\sigma$. Так как

² Соломатов В.И., Селяев В.П. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов. М.: Стройиздат, 1987.

³ Панасюк В.В. Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. Киев: Наукова думка, 1968.

площадь связей пропорциональна их количеству ($A = aN$), то можно записать для любого времени t , что усилие, воспринимаемое связями, равно

$$f = N(t)a\sigma = N_0 \exp\{-P\omega t\} a\sigma. \quad (9)$$

В предельном случае, когда $P\omega t = 1$, работа e_m будет определяться по формуле

$$e_m = N_0 a \sigma \delta_k e^{-1}.$$

Тогда уравнение температурно-временной зависимости прочности с учетом механической e_m , химической e_x энергий примет вид

$$\tau = \tau_0 \exp\left\{\frac{U_0 - 0,5N_0 \sigma \delta_k e^{-1} - \mu c}{RT}\right\}. \quad (10)$$

Очевидно, если в формуле (10) принять $c = 0$ и ввести обозначение $\gamma = 0,5N_0 \cdot \delta_k / e$, то получим формулу С.Н. Журкова.

Формула (10) выведена при условии $c = \text{const}$, т.е. она пригодна для оценки долговечности материала в микрообъеме или при равномерном распределении агрессивной среды в объеме образца. В реальных условиях этот случай встречается крайне редко.

Для анализа химического взаимодействия композиционного материала с агрессивной средой будем использовать формулу (10) и экспериментальные данные, приведенные в работе В.И. Соломатова. Определение химической стойкости материала производится (ГОСТ 25881-83) по изменению предела прочности образцов, выдержанных в агрессивных средах при условиях $\sigma = 0$ и $T = \text{const}$. С учетом этих условий формула (10) будет иметь вид

$$\tau = A \exp[(U_0 - \mu c) / kT] = A \exp \Delta u / kT, \quad (11)$$

где Δu — величина эффективного активационного барьера.

Формула (11) определяет зависимость долговечности материала от активности агрессивной среды.

При нагружении образцов до разрушения сжимающей нагрузкой, используя формулу (11), по диаграмме деформирования можно оценить, как изменился начальный активационный барьер U_0 под действием химической энергии e_x , и определить уровень химической энергии, затраченной на разрушение образца.

Рассмотрим графики деформирования, полученные в работе В.И. Соломатова, для полиэфирных полимербетонов, выдержанных в воде и в 10%-ном водном растворе серной кислоты (рис. 1). Площадь, ограниченная кривой деформирования, дает возможность определить работу, затраченную на разрушение образца.

Под действием на композит агрессивных сред диаграмма деформирова-

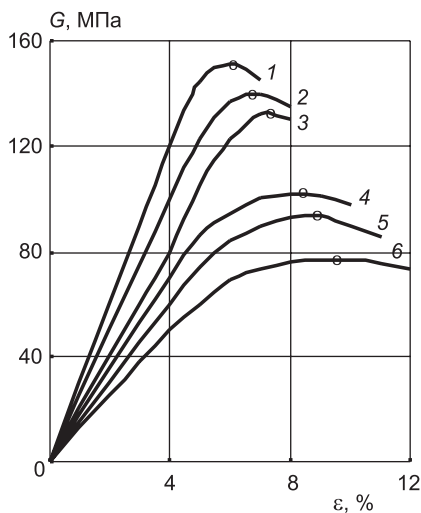


Рис. 1. Диаграмма σ - ϵ при сжатии образцов полиэфирного композита состава 4

Время выдержки в воде, сут: 1 — 0; 2 — 15; 3 — 30; 4 — 175; 5 — 265; 6 — 400

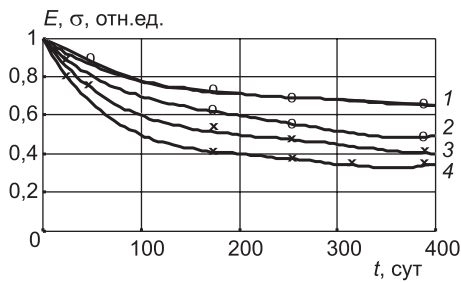


Рис. 2. Кинетика изменения модуля упругости E и предела прочности σ при сжатии образцов из полиэфирных композитов, выдержанных:

1 — (σ) в воде; 2 — (σ) в 10%-ном водном растворе серной кислоты; 3 — (E) в воде; 4 — (E) в 10%-ном водном растворе серной кислоты

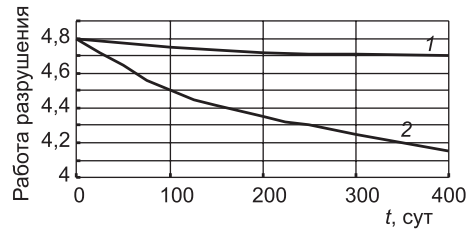


Рис. 3. Кинетика изменения работы разрушения полиэфирных композитов, выдержанных в воде (кривая 1) и 10%-ном водном растворе серной кислоты (кривая 2)

ния изменяется. Анализ показывает, что с увеличением длительности экспонирования образцов происходит снижение значений модуля упругости и предела прочности (рис. 2, таблица), но возрастает предельная деформация (сжимаемость) материала. Каков механизм этих изменений? Наблюдаемые явления могут быть обусловлены как пластификацией полимера, так и разрушением химических связей. Графики деформирования, подобные приведенным на рис. 1, дают возможность оценить, как меняется работа разрушения во времени под действием воды и водного раствора серной кислоты.

Для этого, следуя работе А.Р. Ржаницына⁴, предположим, что диаграмма работы (деформирования) материала описывается кубической параболой вида

$$\sigma = E\varepsilon - B\varepsilon^3 = E\varepsilon - \frac{4E^3}{27\sigma_{bu}^2}\varepsilon^3, \quad (12)$$

где E — начальный модуль упругости;

σ_{bu} — предел прочности материала.

Тогда работу деформации A будем определять по формуле, которая с учетом выражения (12) примет вид

$$A = \int_0^{\varepsilon_{bu}} \sigma d\varepsilon = \frac{E\varepsilon_{bu}^2}{2} - \frac{1}{27} \frac{E^3}{\sigma_{bu}^2} \varepsilon_{bu}^4, \quad (13)$$

где ε_{bu} — относительная деформация, соответствующая значению напряжения σ_{bu} (см. рис. 1 и таблицу).

Графики изменения работы разрушения при действии на полиэфирные композиты воды и водного раствора серной кислоты показаны на

Изменение параметров диаграммы деформирования и работы разрушения полиэфирных композитов от длительности действия 10%-ного водного раствора серной кислоты (состав 4⁵)

Время, сут	σ_{bu} , МПа	E , МПа	ε_{bu}	$A(t)/A(0)$
0	150	2962	0,06	1
10	138	2424	0,0660	0,99
50	128	2222	0,0675	0,95
170	116	1777	0,075	0,94
265	110	1480	0,0815	0,94
395	98	1270	0,0825	0,8

⁴ Ржаницын А.Р. Изгиб и сложное сопротивление прямоугольного сечения стержня при произвольной диаграмме работы материала / Расчет тонкостенных пространственных конструкций. М.: ЦНИИСК, 1964. С. 7–23.

⁵ Соломатов В.И., Селяев В.П. Указ. соч.

рис. 3. Работа A рассчитывалась по формуле (13) и экспериментальным данным, которые принимались по графикам деформирования (см. рис. 1) и данным таблицы.

При действии воды на полиэфирный композит происходят адсорбционное понижение прочности и пластификация материала. Коэффициент размягчения достигает 0,4...0,6. Однако работа разрушения практически не зависит от длительности действия воды. Следовательно, химические реакции гидролиза полимера при нормальной температуре не играют существенной роли.

Под действием водного раствора серной кислоты работа разрушения уменьшается почти на 20 %. Очевидно, раствор серной кислоты снижает химическую энергию связей в полимерном композите.

Анализ результатов проведенных исследований показывает:

— применение модели Бозе–Эйнштейна дает возможность получить временную зависимость прочности материалов как от уровня действующих напряжений, температур, так и от химической активности агрессивной среды;

— формула С.Н. Журкова является частным случаем (при $C = 0$) формулы (10), которая получена теоретически;

— структурно чувствительный коэффициент γ находится в прямой зависимости от параметра δ_k модели Леонова — Панасюка;

— временную зависимость прочности (10) можно применять для оценки механизма взаимодействия материала с агрессивной средой;

— для всестороннего анализа области и возможностей применения формулы (10) необходимо проведение объемных экспериментальных исследований различных материалов с варьированием уровня напряжений, температуры, активности агрессивной среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Журков, С.Н. Микромеханика разрушения полимеров. Проблемы прочности [Текст] / С.Н. Журков, В.С. Куксенко, А.И. Слуцкер. — Киев : Наук. думка, 1971. — Кн. 2.
2. Журков, С.Н. Проблема прочности твердых тел [Текст] / С.Н. Журков // Вест. АН СССР. — 1957. — № 11. — С. 78–82.
3. Манин, В.П. Физико-химическая стойкость полимерных материалов в условиях эксплуатации [Текст] / В.П. Манин, А.Н. Громов. — Л. : Химия, 1980. — 248 с.
4. Зуев, Ю.С. Разрушение полимеров под действием агрессивных сред [Текст] / Ю.С. Зуев. — М. : Химия, 1972. — 232 с.

СЕЛЯЕВ В.П., д-р техн. наук, проф.

Мордовский государственный университет, г. Саранск

КУПРИЯШКИНА Л.И., канд. техн. наук, проф.

Мордовский государственный университет, г. Саранск

КОРОВИНА О.Ю., асп.

Мордовский государственный университет, г. Саранск

КЕЧУТКИНА Е.Л., инж.

Мордовский государственный университет, г. Саранск

Получено после доработки 23.06.10

Selyaev V.P., doctor of technical sciences, professor, Mordovia State University, Russia

Kupriyashkina L.I., candidate of technical sciences, professor, Mordovia State University, Russia

Korovina O.Yu., post-graduate student, Mordovia State University, Russia

Kechutkina E.L., engineer, Mordovia State University, Russia

**THE MODEL OF BOSE — EINSTEIN'S APPLICATION
FOR TIME DEPENDENCE OF COMPOSITE MATERIALS
STRENGTH ACCOUNTING OF HOSTILE ENVIRONMENT,
TEMPERATURE AND STRESS**

Time dependence of strength of composite materials is theoretically found; it includes joint action of hostile environment, temperature and mechanical tension. The possibility of applying of this dependence for analysis of chemical interaction of environment and materials.

Key words: strength, composite, hostile environment.

REFERENCES

1. Zhurkov, S.N. Micromechanics of polymers' destruction. The problems of solidity [Text] / S.N. Zhurkov, V.S. Kuksenko, A.I. Slutsker. — Kiev : Naukova Dumka, 1971.
2. Zhurkov, S.N. Problems of solids [Text] / S.N. Zhurkov // Vestnik of AS USSR. — 1957. — N 11. — P. 78–82.
3. Manin, V.P. Physical and chemical firmness of polymer materials under the conditions of exploitation [Text] / V.P. Manin, A.N. Gromov. — L. : Chemistry, 1980. — 248 p.
4. Zuev, Yu.S. The destruction of polymers in aggressive environment [Text] / Yu.S. Zuev. — M. : Chemistry, 1972. — 232 p.

УДК 691.32:539.217.3

**Г.И. ОВЧАРЕНКО, Н.Г. БРОВКИНА, В.Г. БЫКОВ,
М.П. ИЗОСИМОВ**

РОЛЬ СОЛЕЙ В СОСТАВАХ ГИДРОИЗОЛЯЦИИ ПРОНИКАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ ДЛЯ БЕТОНОВ

Исследовано влияние проникающей гидроизоляции и отдельных ее компонентов на водонепроницаемость цементных бетонов. Рассмотрен процесс фазообразования цементного камня в присутствии солей проникающей гидроизоляции. Приведены результаты исследования влияния солей на пористость цементного камня. Установлен механизм действия солей проникающей гидроизоляции.

Ключевые слова: гидроизоляция проникающего действия, фазообразование, пористость цементного камня.

Эксплуатационные условия в большинстве регионов Российской Федерации, связанные с суровым климатом, агрессивными техногенными средами, глобальным поднятием уровня грунтовых вод, делают проблему гидроизоляции в строительстве чрезвычайно актуальной. Традиционные материалы на битумной и полимерной основе уже не в полной мере отвечают запросам строителей по надежности и технологичности применения. Наряду с новыми и известными ранее рулонными и мастичными водонепроницаемыми материалами в мировой строительной практике все чаще применяются гидроизоляционные материалы проникающего действия. Однако состав таких композиций часто не раскрывается. Не известен и механизм их действия.

Такие композиции в своем составе, как правило, содержат цемент, песок и комплекс солей. Исследование данных смесей позволило нам установить, что основную долю в повышение водонепроницаемости бетона вносит их солевая составляющая. Так, при обработке комплексом солей водонепроницаемость контрольного образца увеличивается на 78 %, а при использовании твердой нерастворимой части (песок + цемент) — лишь на 43 % от значения водонепроницаемости образца, обработанного полным составом проникающей гидроизоляции [1]. Полученные результаты подтверждают эффективность химических добавок в гидроизоляционных составах. Поэтому в дальнейшем мы исследовали влияние только солевой составляющей на водонепроницаемость и фазовый состав цементного камня (ЦК) для того, чтобы установить механизм действия солей в составах проникающей гидроизоляции.

В эксперименте в качестве сырьевых материалов использовали: портландцементы ПЦ М400 Д20 и М500 Д0 Искитимского цементного завода, речной (р. Обь) песок, а также следующие химические добавки: азотнокислый кальций, сернокислый натрий, углекислый натрий, нитрат натрия, карбонат натрия, сульфат натрия, хлорид кальция, карбид кальция, гидроксид кальция, известь негашеную.

Для проведения испытаний на водонепроницаемость изготавливали образцы-цилиндры диаметром 100 и высотой 50 мм из цементно-песчаного

© Овчаренко Г.И., Бровкина Н.Г., Быков В.Г., Изосимов М.П., 2010

раствора подвижностью Пк2 по ГОСТ 28013–98 «Растворы строительные. Общие технические условия», которые «продавливались» водой на лабораторной установке, оснащенной гидроцилиндром с ручным приводом, до появления мокрого пятна. Примененная методика позволяет повысить показатели по сравнению с основной методикой по ГОСТ 12730.5–84 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости» в 2,6 раза.

В последующем растворный камень, прошедший предварительную тепловлажностную обработку или твердение при нормальных условиях, пропитывали растворами солей. На рис. 1 приведены результаты испытания смесей солей проникающей гидроизоляции с поочередным

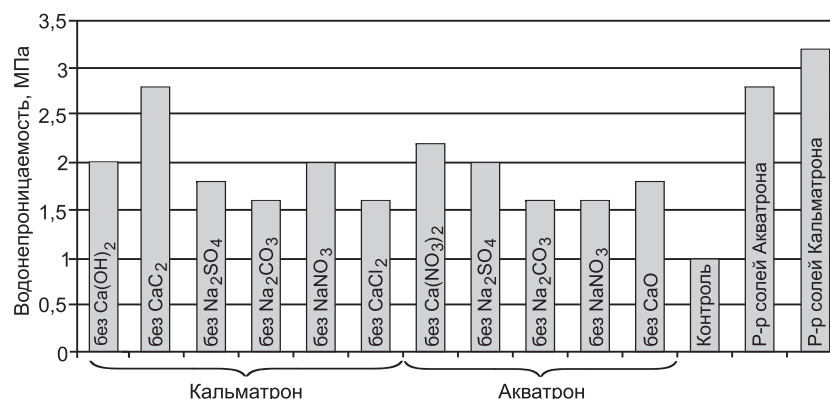


Рис. 1. Водонепроницаемость растворного камня, пропитанного различными комплексами солей — аналогами Кальматрона и Акватрона

вычленением одной из составляющих. Исходные композиции являются аналогами известных гидроизоляций Акватрона и Кальматрона. Снижение водонепроницаемости цементно-песчаных образцов, обработанных составами, в которых исключены Ca(OH)₂, нитрат кальция Ca(NO₃)₂ и карбид кальция CaC₂, наименьшее. Таким образом, сделан вывод о минимальном влиянии этих солей на повышение водонепроницаемости.

Исследования также показали, что наибольший эффект в действие композиций-аналогов Акватрона вносят нитрат натрия NaNO₃ и карбонат натрия Na₂CO₃, а Кальматрона — хлорид кальция CaCl₂ и карбонат натрия Na₂CO₃. Их отсутствие в составах экспериментальных композиций приводит к максимальному снижению водонепроницаемости.

В табл. 1 представлены результаты исследования водонепроницаемости растворного камня, пропитанного отдельно некоторыми солями, входящими в состав известной проникающей гидроизоляции, а также сульфатом алюминия Al₂(SO₄)₃ и формиатом натрия HCOONa, которые были дополнительно включены нами в работу [1].

Для выявления механизма формирования фазового состава

Таблица 1
Водонепроницаемость растворного камня, пропитанного различными солями после предварительной тепловлажностной обработки

Наименование соли	Водонепроницаемость, МПа			
	1 сут	3 сут	7 сут	28 сут
Na ₂ CO ₃	0,75	1,25	1,45	1,6
NaNO ₃	0,5	1,2	1,55	1,8
CaCl ₂	0,7	1,25	1,55	1,75
HCOONa	0,45	1,05	1,45	1,7
Al ₂ (SO ₄) ₃	1,05	1,55	1,9	2,1
Контроль без пропитки	0,2	0,6	0,8	1,0

цементного камня в присутствии солей проникающей гидроизоляции были проведены рентгенофазовый (РФА) и дифференциально-термический (ДТА) анализы, а также ртутная порометрия контрольного бессолевого цементного камня и цементного камня, обработанного отдельно хлоридом кальция, нитратом натрия, сульфатом натрия, а также сульфатом алюминия и формиатом натрия, не входящими в известные составы проникающей гидроизоляции.

Так, РФА (рис. 2) показывает, что пропитка предварительно твердевшего камня нитратом натрия NaNO_3 приводит к более активному и большому образованию этtringита и моногидросульфоалюмината кальция. Об этом можно судить по повышенной интенсивности линий с соответствующими межплоскостными расстояниями: 9,77; 5,62; 4,69; 3,88; 3,48 Å — для AFt и 8,98; 4,71; 2,88; 2,45; 1,80; 1,63 Å — для AFm [2]. Заметно снижение количества $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (d , Å: 4,93; 2,63; 1,93). Кривые комплексных термограмм цементного камня, обработанного нитратом натрия NaNO_3 , также показывают большее количество гидросульфоалюминатов AFt и AFm фаз в области 135 и 199 °С в сравнении с термограммами цементного камня. Эндоэффекты при 135, 275, 597 °С отражают ступенчатую дегидратацию гидронитроалюмината кальция $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, образующегося в результате реакции образования гидроалюмината кальция, гидроксида кальция и нитрата натрия. В сравнении с контрольным значением уменьшается площадь эндоэффекта при 486 °С, отражающего дегидратацию $\text{Ca}(\text{OH})_2$, об этом свидетельствует и уменьшение потери массы на данном эффекте с 3,01 до 2,27 % [2].

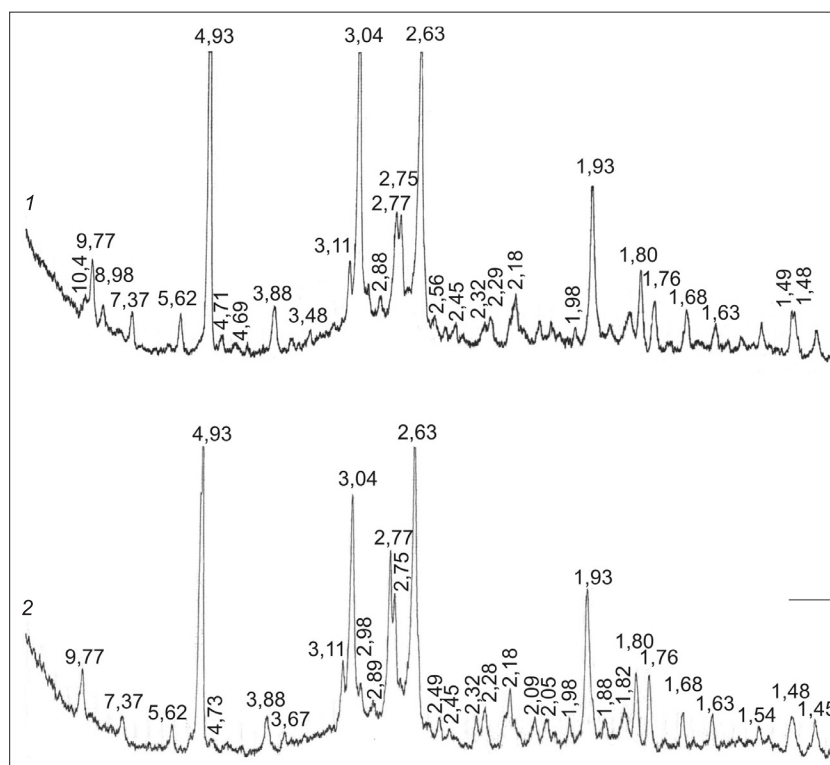


Рис. 2. Рентнограммы цементного камня, исходного (№ 2) и обработанного раствором нитрата натрия NaNO_3 (№ 1) после предварительного твердения в течение 3 мес

Из данных РФА следует, что в затвердевшем цементном камне, пропитанном раствором хлорида кальция CaCl_2 , появляются новые фазы по сравнению с исходным цементом: моногидрохлорид алюмината кальция $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (d , Å: 7,89; 2,7; 2,56; 2,32) и высокоосновная форма оксихлорида кальция $3\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (d , Å: 2,71; 2,56; 2,41; 2,16) [3, 4]. Добавка хлорида кальция способствует увеличению в образцах количества высокоосновной формы гидросульфалюмината кальция ГСАК-3 (d , Å: 9,77; 5,62; 3,88; 2,56) по сравнению с необработанным цементным камнем. Вместе с этим цементный камень с CaCl_2 отличается от контрольного цементного состава пониженным содержанием $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (d , Å: 4,93; 3,11; 2,63; 1,93). Данные РФА подтверждает дифференциально-термическое исследование (рис. 3). Наличие эндоэффектов при 179, 323, 827 °С и экзоэффекта при 600 °С свидетельствует о том, что обработка цементного камня раствором CaCl_2 приводит к образованию гидрохлоралюмината кальция $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ [3]. Анализ дериватограмм показывает большее количество гидросульфалюминатов кальция (эндоэффект в области 140 °С). Сокращается площадь эндоэффекта при 490 °С, что свидетельствует об уменьшении содержания $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

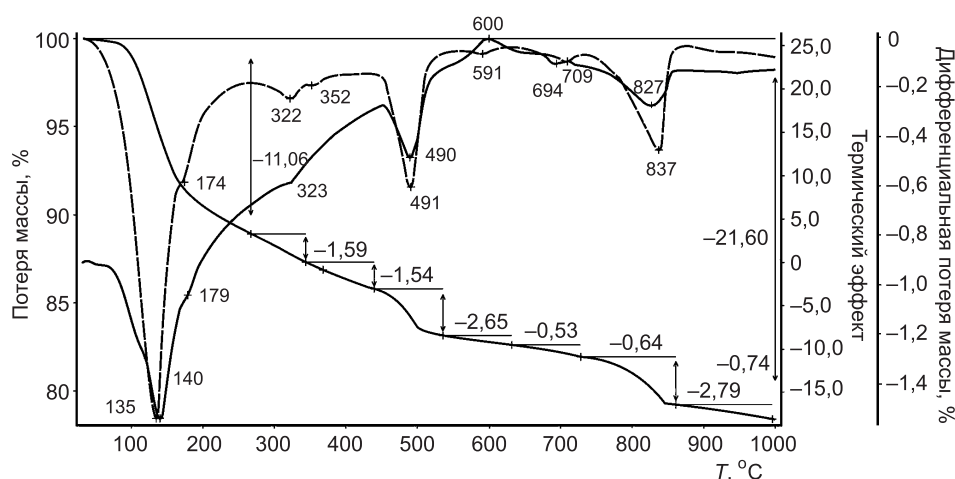


Рис. 3. Дериватограмма цементного камня, гидратированного в течение 3 мес и обработанного после этого раствором хлорида кальция CaCl_2

При обработке цементного камня раствором сульфата натрия Na_2SO_4 в результате обменной реакции последнего с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ образуется дополнительное количество гипса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, что приводит к увеличению количества этtringита ГСАК-3 (d , Å: 9,77; 5,62; 3,88; 3,60). Повышение его количества отражают и данные ДТА: увеличивается площадь, наблюдается потеря массы на эндоэффекте при 141 °С. Наличие Na_2SO_4 уменьшает содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Площадь эндоэффекта при 500 °С уменьшается, как и потеря массы, которая снижается в сравнении с контрольным значением на данном эффекте с 3,01 до 2,68 % (табл. 2).

Также дополнительное образование этtringита с межплоскостными расстояниями 9,77; 5,62; 3,88; 4,69; 2,56 Å фиксируется при обработке цементных образцов сульфатом алюминия $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Увеличение интенсивности линий ГСАК-3 (d , Å: 9,77; 3,88; 3,59; 3,24; 2,56) отмечено и на

Таблица 2

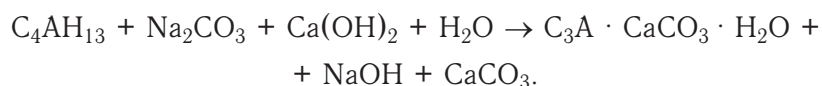
Основные новообразования в цементном камне, обработанном химическими добавками после предварительного твердения в течение трех месяцев

Материал	Некоторые гидратные фазы	
	РФА, $d, \text{Å}$	ДТА, °С
ПЦ+NaNO ₃	ГСАК-3 (9,77; 5,62; 4,69; 3,88; 3,48) ГСАК-1 (8,98; 4,71; 2,88; 2,45; 1,80; 1,63) 3CaO · Al ₂ O ₃ · Ca(NO ₃) ₂ · 10H ₂ O (8,98; 3,88; 3,04; 2,88)	ГСАК-3, ГСАК-1 (135, 199) 3CaO · Al ₂ O ₃ · Ca(NO ₃) ₂ · 10H ₂ O (135, 275, 597)
ПЦ+CaCl ₂	3CaO · Al ₂ O ₃ · CaCl ₂ · 10H ₂ O (7,89; 2,7; 2,56; 2,32) 3Ca(OH) ₂ · CaCl ₂ · 12H ₂ O (2,71; 2,56; 2,41; 2,16) ГСАК-3 (9,77; 5,62; 3,88; 2,56)	ГСАК-3 (140) 3CaO · Al ₂ O ₃ · CaCl ₂ · 10H ₂ O (Эндоэффекты 179,323,827. Экзоэффект 600)
ПЦ+Na ₂ SO ₄	ГСАК-3 (9,77; 5,62; 3,88; 3,6)	ГСАК-3 (141)
ПЦ+Al ₂ (SO ₄) ₃	ГСАК-3 (9,77; 5,62; 3,88; 4,69; 2,56)	ГСАК-3 (145)
ПЦ+HCOONa	ГСАК-3 (9,77; 3,88; 3,59; 3,24; 2,56)	ГСАК-3 (126)

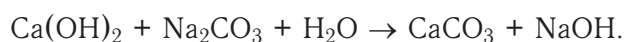
рентгенограммах образцов, обработанных раствором формиата натрия HCOONa [2].

Данные РФА и ДТА свидетельствуют о том, что пропитка цементного камня растворами солей CaCl₂, NaNO₃, Na₂SO₄ приводит к взаимодействию их с составляющими цементного камня с образованием главным образом различных AFt и AFm фаз.

Механизм действия карбоната натрия Na₂CO₃ можно представить как его реакцию с гидроалюминатом кальция в присутствии гидроксида кальция с последующим образованием двух труднорастворимых продуктов, один из которых представлен двойной солью:



Также возможна простая обменная реакция:



Гидрокарбоалюминат и карбонат кальция кольматируют поры растворного камня. Вследствие этого процесса происходит увеличение водонепроницаемости, что отражено в приведенных выше исследованиях.

Наличие дополнительных новообразований в уже затвердевшем камне должно снижать его пористость. Для подтверждения этого была проведена ртутная порометрия образцов, пропитанных указанными выше солями. Согласно данным порометрии (рис. 4), суммарная пористость образцов, обработанных растворами солей, уменьшается. При этом наблюдается существенное сокращение пор размером $10^4 > r > 10^3 \text{ Å}$, т.е. пор капиллярного характера, располагающихся между мало гидратированными частицами цемента, а также в массе кристаллизующихся новообразований. Объем пор радиусом 1000 Å (100 нм)... $10\,000 \text{ Å}$ (1000 нм) уменьшается на 60...65 %. Заметно снижение (на 40 %) количества микропор радиусом $10^3 > r > 10^2 \text{ Å}$, возникающих между отдельными кристаллами гидратов и их сростками в массе новообразований.

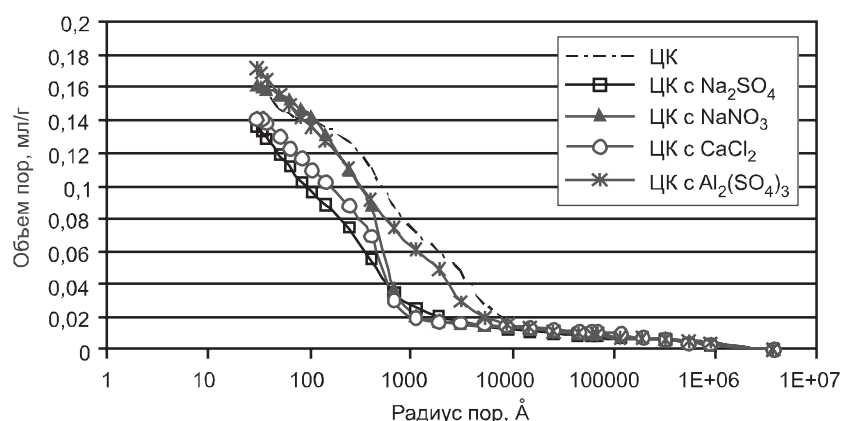


Рис. 4. Распределение пор по размерам в образцах, обработанных растворами солей CaCl_2 , NaNO_3 , Na_2SO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$

Таким образом, уплотнение структуры цементного камня в бетоне при пропитке его растворами солей проникающей гидроизоляции происходит из-за синтеза дополнительного количества AFt , AFm фаз и CaCO_3 , коагулирующих поровое пространство камня. При их образовании снижаются размер и объем пор, что приводит к увеличению водонепроницаемости бетона. Установленный нами механизм действия солей некоторых проникающих гидроизоляций позволяет целенаправленно разрабатывать другие гидроизоляционные композиции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О в ч а р е н к о, Г.И. Исследования гидроизоляционных систем проникающего действия [Текст] / Г.И. Овчаренко, Н.Г. Бровкина и др. // Строительные материалы XXI века. Кровельные и изоляционные материалы. — 2008. — № 6. — С. 34–36.
2. Г о р ш к о в, В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ [Текст] / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. — М. : Высш. шк., 1981. — 335 с.
3. Р а т и н о в, В.Б. Добавки в бетон [Текст] / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг. — М. : Стройиздат, 1989. — 188 с.
4. Р а м а ч а н д р а н, В.С. Добавки в бетон [Текст] / В.С. Рамачандран, Р.Ф. Фельдман, М. Коллепардн и др. — М. : Стройиздат, 1988. — 571 с.

ОВЧАРЕНКО Г.И., д-р техн. наук, проф.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

БРОВКИНА Н.Г., асп.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

БЫКОВ В.Г., студ.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

ИЗОСИМОВ М.П., студ.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул

Получено 09.06.10

Ovcharenko G.I., doctor of technical sciences, professor, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russia

Brovkina N.G., post-graduate student, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russia

Bykov V.G., student, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russia

Izosimov M.P., student, Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul, Russia

THE ROUL OF SALTS IN PENETRATING WATERPROOFING COMPOSITION FOR CONCRETE

Effect of penetrating sealing materials and them individual components on waterproofing of cement concrete was researched. Process phase formation cement stone with salts of penetrating waterproofing composition is considered. Contains the results of research of influence salts on porosity of cement stone.

Key words: waterproof systems penetrating action, phase formation, porosity of cement stone.

REFERENCES

1. Ovcharenko, G.I. The studies of a waterproofing system with penetrating action [Text] / G.I. Ovcharenko, N.G. Brovkina, E.P. Potapova et al. // Construction materials XXI century. Roofing and insulation materials. — 2008. — N 6. — P. 34–36.
2. Gorshkov, V.S. Methods of physical-chemical analysis of binding agents [Text] / V.S. Gorshkov, V.V. Timashev, V.G. Savel'ev. — M. : Higher school, 1981. — 335 p.
3. Ratinov, V.B. Additives in concrete [Text] / V.B. Ratinov, T.I. Rozenberg. — M. : Stroyizdat, 1989. — 188 p.
4. Ramachandran, V.S. Additives in concrete [Text] / V.S. Ramachandran, R.F. Feldman, M. Collepardi. — M. : Stroyizdat, 1988. — 571 p.

УДК 691.54:541.6

Ш.М. РАХИМБАЕВ, Н.Н. ОНОПРИЕНКО

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО ТЕСТА С ДОБАВКАМИ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ПОЛИМЕРОВ

Приведены результаты исследования влияния вязкости 1%-ного водного раствора полимера и состава функциональных групп водорастворимых полимеров отечественного и зарубежного производства на реологические показатели цементного теста.

Ключевые слова: водорастворимые полимеры, эфиры целлюлозы, функциональная группа полимера, предел текучести, градиент скорости сдвига, пластическая вязкость.

Водорастворимые эфиры целлюлозы — карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), метилцеллюлоза (МЦ), оксиэтилцеллюлоза (ОЭЦ), а также их производные являются важнейшими компонентами модифицированных цементных систем и цементно-полимерных композиций нового поколения, которые пришли взамен полимерцементных композиций с добавкой поливинилацетатной и других эмульсий.

Для разработки цементно-полимерных материалов различного назначения (штукатурных смесей, кладочных растворов, тампонажных суспензий и т.п.) необходимо знание закономерностей влияния состава модифицирующей добавки на свойства цементных систем. Это позволит целенаправленно создавать штукатурные, кладочные и другие смеси с заданными свойствами, используя наиболее подходящие для каждого конкретного случая исходные компоненты [1].

Известно, что свойства цементно-полимерных смесей зависят в основном от двух важнейших показателей химических добавок — молекулярной массы и состава функциональных групп. В [1] показано, что важнейшей характеристикой водорастворимых полимеров, связанной с их молекулярной массой, является вязкость их 1%-ного водного раствора. Чем она выше, тем меньше расход полимера как регулятора водоотделения, адгезионных свойств и других показателей цементно-полимерных систем.

Целью данной работы является исследование влияния приведенной вязкости 1%-ного водного раствора полимера и состава функциональных групп водорастворимых полимеров отечественного и зарубежного производства на реологические показатели цементно-полимерных растворов.

В таблице приведена вязкость 1%-ных водных растворов водорастворимых полимеров и для сравнения поливинилацетатной эмульсии.

Для исследования свойств цементно-полимерных систем использован ротационный вискозиметр REOTEST–2.1 с кольцевым зазором между коаксиальными цилиндрами 3...4 мм. В качестве исходных материалов использован цемент ЦЕМ I 42,5 по ГОСТ 31108–2003 Белгородского цементного завода. Водоцементное отношение варьировалось в пределах 0,35...0,5 с учетом тех реальных величин этих показателей, которые характерны для цементно-полимерных композиций с добавкой песка как

Характеристика применяемых добавок

№ п/п	Наименование добавки	Функциональная группа полимера	Вязкость 1%-ного водного раствора, МПа·с	Производитель
1	Карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ)	-COO-	8,07	ОАО «Полиэкс», г. Пермь
2	Метилцеллюлоза (МЦ)	-OCH ₃ , -OH	52,73	ОАО «Усольехимпром», г. Усолье-Сибирское
3	Оксиэтилцеллюлоза (ОЭЦ-1)	-OC ₂ H ₅ , -OH	7,91	Опытный завод ВНИИСС, г. Владимир
4	Оксиэтилцеллюлоза (ОЭЦ-4)	-OC ₂ H ₅ , -OH	671,16	Dow Chemical, США
5	Поливинилацетатная эмульсия (ПВА)	-OH	1,81	ООО «ЛАКРА СИНТЕЗ», г. Москва
6	Полиакриламид (ПАА)	-CONH ₂	140,00*	ООО Научно-производственная фирма «НИТПО», г. Краснодар
7	Полиоксиэтилен (ПО)	-O-	22,45	ПО «Оргсинтез», г. Казань

* Вязкость 0,5%-ного раствора ПАА.

мелкого заполнителя. К сожалению, современные ротационные и капиллярные вискозиметры не позволяют исследовать технологические свойства цементно-песчаных смесей, поэтому применялось цементное тесто без добавки заполнителя.

Реограммы цементно-полимерных смесей с добавками водорастворимых полимеров различного состава, а также ПВА приведены на рисунке. Во всех случаях дозировка полимерных добавок приведена в массовых процентах сухого вещества по отношению к массе цемента.

Анализ приведенных реограмм приводит к следующим выводам.

Исходное цементное тесто без добавок с В/Ц 0,35 представляет собой вязкопластичное тело со слабо выраженной нелинейностью реологических свойств и узкой петлей гистерезиса, расположенной в области градиентов скорости сдвига $\dot{\gamma}$ от 45 с⁻¹ и более.

При увеличении водоцементного отношения до 0,5 напряжение сдвига на всем интервале градиентов снижается более чем втрое, но расширяется петля гистерезиса между прямой и обратной реограммами, что свидетельствует об усилении тиксотропных свойств.

При добавлении 0,5 % метилцеллюлозы резко увеличиваются нелинейность реограмм и пластическая вязкость суспензий, особенно в области градиентов скорости сдвига до 50 с⁻¹. Так же, как и в контрольных цементных суспензиях без добавок, увеличение водоцементного отношения цементного теста с добавкой 0,5 % МЦ приводит к снижению напряжения сдвига и расширению петли гистерезиса между прямой и обратной реограммами. При этом незначительно возрастает предел текучести цементного теста в сравнении с бездобавочными составами.

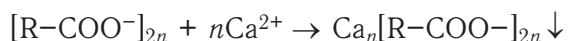
При добавлении 0,2 и 0,5 % ОЭЦ-1 с вязкостью 1%-ного водного раствора 7,91 МПа·с реограмма цементного теста состоит практически из двух прямолинейных участков с резким изломом в области градиентов скорости сдвига 15...30 с⁻¹. Очевидно, что при малых скоростях сдвига

наблюдается течение в структурном режиме в соответствии с моделью Шведова, а при возрастании скорости сдвига — полное разрушение флокулентной структуры и течение в режиме Бингама.

При вводе 0,5 % ОЭЦ-1 цементное тесто приобретает очень широкую петлю гистерезиса. При добавлении 0,2 % ОЭЦ-4, имеющего вязкость 1%-ного водного раствора 671,16 МПа · с, и В/Ц = 0,5 тесто приобретает сильную нелинейность реограммы при небольшом пределе текучести (15 Па) и обладает повышенной вязкостью. При снижении В/Ц до 0,35 ОЭЦ-4 предел текучести цементно-полимерного теста с добавкой 0,2 % возрастает до 90 Па. При этом вязкость также резко увеличивается.

Уменьшение В/Ц цементно-полимерного теста с добавкой 0,5 % ОЭЦ-4 до 0,35 вызывает рост предела текучести до 400 Па. В области градиентов скорости сдвига, равных всего нескольким обратным секундам, происходит резкое падение напряжения сдвига от 400 до 140 Па с последующим течением в нелинейном режиме. Этот состав также характеризуется большой петлей гистерезиса, особенно в области градиентов скорости сдвига до 30 с⁻¹.

При вводе 0,5 % КМЦ наблюдается сильное падение предела текучести и пластической вязкости суспензии. Это обусловлено коагуляционным разжижением цементного теста из-за взаимодействия карбоксилатной группы полимера с гидроксидом кальция, который выделяется при гидролизе алита:



Здесь R — моносахаридный остаток, из которого состоит молекула КМЦ.

Полиакриламид обладает наибольшей молекулярной массой среди исследованных добавок, поэтому вязкость 0,5%-ного водного его раствора составляет 140 МПа · с. Цементное тесто с добавкой 0,25 % ПАА при В/Ц = 0,5 имеет очень большую пластическую вязкость и предел текучести, равный 94 Па. Характер течения цементного теста с добавкой 0,25 % ПАА очень сложный, так как оно в области малых градиентов скорости сдвига (до 20 с⁻¹) показывает аномальное течение, а в дальнейшем реограмма состоит из двух почти прямолинейных участков с перегибом в области градиентов скорости сдвига 80...85 с⁻¹. Цементно-полимерная система с добавкой ПАА представляет ограниченный интерес для строительного комплекса, поскольку этот полимер при взаимодействии с портландцементом подвергается гидролизу с выделением аммиака.

При добавлении 0,5 % ПО цементное тесто с В/Ц = 0,5 приобретает свойство нелинейного вязкопластического тела с развитой петлей гистерезиса и повышенной пластической вязкостью. При этом предел текучести цементного теста находится в интервале 10...20 Па, т.е. мало отличается от контрольного состава без добавок. При увеличении В/Ц данного состава до 0,66 пластическая вязкость суспензии и предел текучести снижаются практически до нуля. Реограмма при этом состоит из двух почти прямолинейных участков с перегибом.

Реограммы с добавкой 0,5 % ПО с В/Ц = 0,66 сходны с кривыми течения цементного теста с добавкой 0,2 % ОЭЦ-1 с В/Ц = 0,5.

Сравнение реограмм цементного теста с добавкой 0,5 и 3 % ПВА с В/Ц = 0,5 и 0,4 соответственно показывает, что при повышенных дозировках ПВА и пониженных В/Ц цементное тесто приобретает большой предел текучести (до 130 Па) с аномальным течением в области малых градиентов скорости

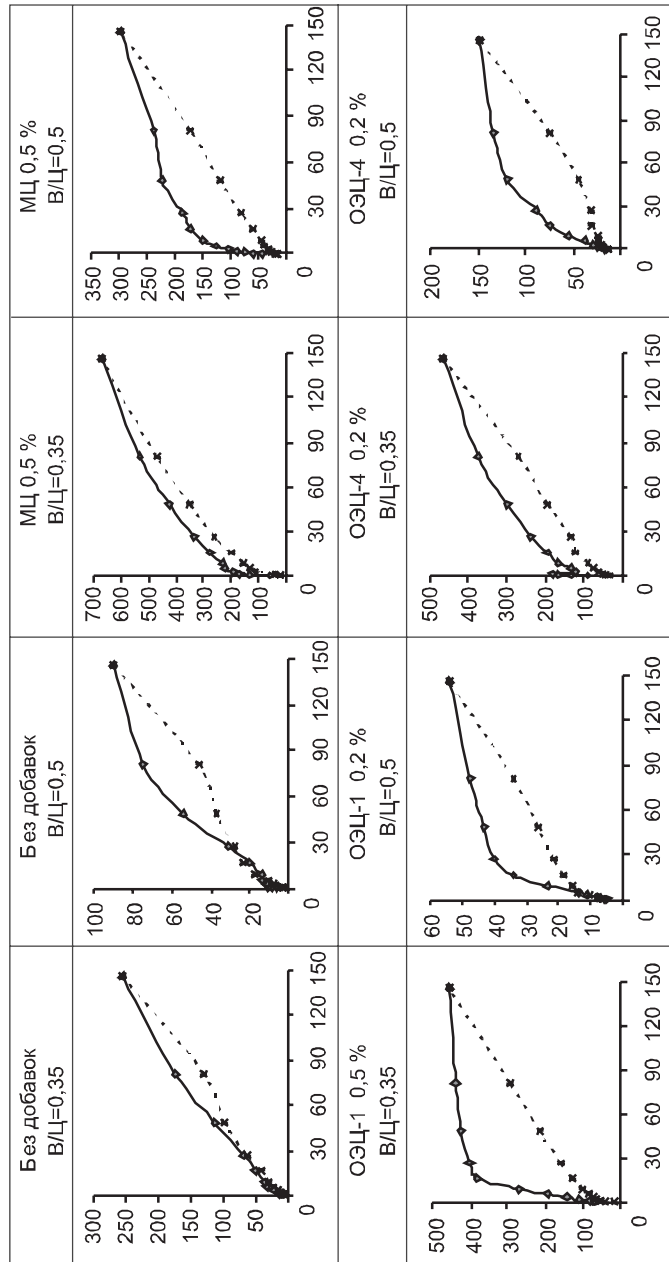
сдвига. Реограмма цементно-полимерных композиций с добавкой 3 % ПВА аналогична реограмме цементного теста с добавкой 0,5 % ОЭЦ-4 с $V/C = 0,35$. Однако предел текучести последнего втрое больше и достигает 400 Па. В остальном характер течения цементного теста с добавками двух этих реагентов чрезвычайно схож, вплоть до мелких деталей, но вязкость и напряжение сдвига теста при добавлении ОЭЦ значительно больше.

Обобщая изложенное, можно отметить следующие закономерности.

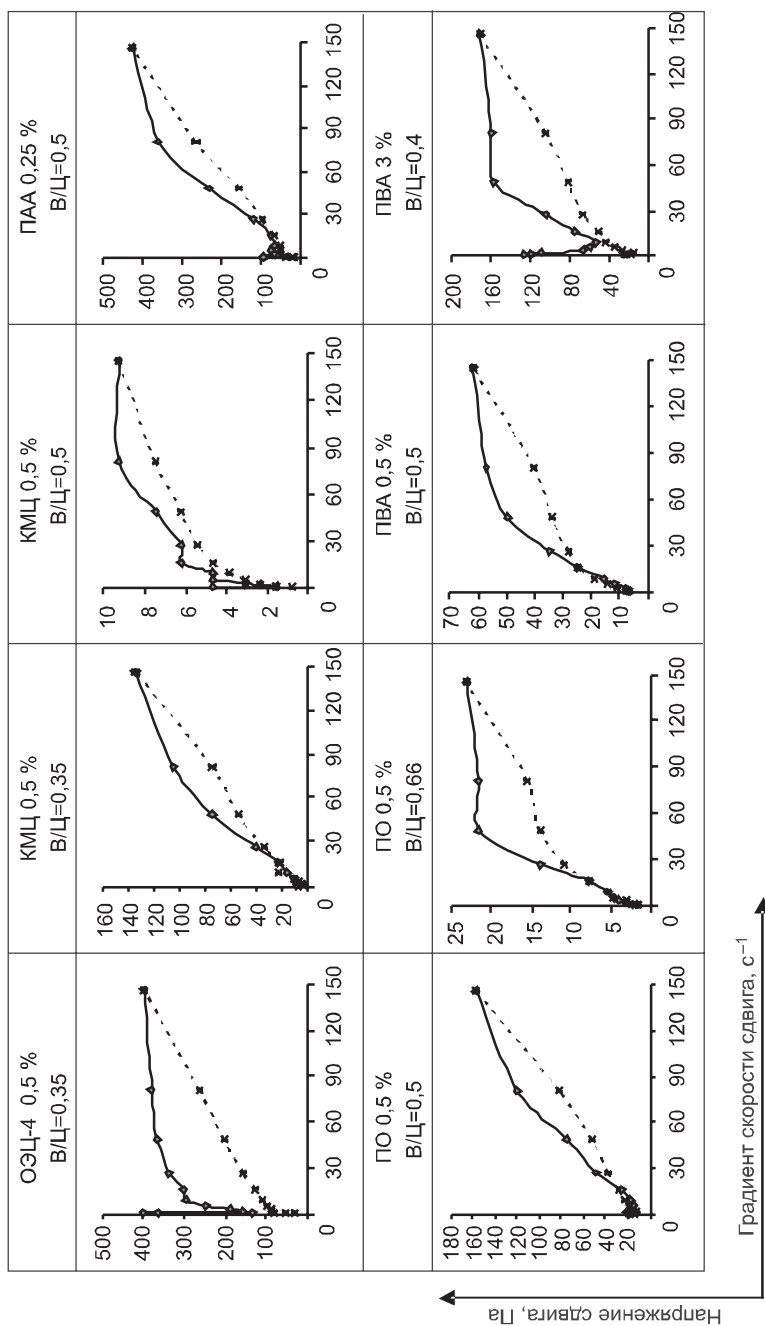
Добавка МЦ эффективно снижает предел текучести цементных систем и повышает их пластическую вязкость. В связи с этим цементно-полимерные смеси с добавкой МЦ представляют интерес при получении самовыравнивающихся кладочных растворов для тонкослойной кладки, описанных в [2].

Это обусловлено тем, что для тонкослойной кладки необходимы цементные системы, обладающие минимальным пределом текучести и образующие кладочный слой минимальной толщины.

Судя по приведенным реограммам, а также данным [2], цементные системы с добавками высоковязкой ОЭЦ характеризуются повышенной адгезией к поверхностям при малых скоростях сдвига и обладают повышенным пределом текучести, что обеспечивает устойчивость строительных растворов к сползанию. В связи с этим высоковязкие разновидности ОЭЦ с вязкостью 1%-ного водного раствора 600 МПа · с и более целесо-



Реограммы цементных суспензий без
 ————— прямой ход



добавок и с добавками полимеров:

----- обратный ход

образно использовать для производства сухих строительных смесей, предназначенных для штукатурных, шпаклевочных, облицовочных и других отделочных работ.

Достоинством водорастворимых полимеров в сравнении с ПВА является более низкий расход дорогостоящего полимера (до десяти раз и более). Это обусловлено тем, что каждая функциональная группа водорастворимых полимеров, образующих в водном растворе нитевидные (фибриллярные) структуры, активно участвует в формировании технологических свойств (в их модифицировании), тогда как ПВА состоит из крупных свернутых гло-

бул, большая часть функциональных групп которых находится во внутренних слоях последних и не оказывает существенного влияния на свойства цементных систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рахимаев, Ш.М. Регулирование технических свойств тампонажных растворов [Текст] / Ш.М. Рахимаев. — Ташкент : Фан, 1976. — 159 с.
2. Оноприенко, Н.Н. Кладочные растворы на основе минеральных вяжущих с полимерными добавками [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.Н. Оноприенко. — Белгород, 2004. — 23 с.

РАХИМБАЕВ Ш.М., д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ОНОПРИЕНКО Н.Н., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено 09.06.10

Rakhimbaev Sh.M., doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Onoprienko N.N., candidate of technical sciences, assistant professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

RHEOLOGICAL PROPERTIES OF CEMENT SLURRY WITH WATER-SOLUBLE POLYMER ADDITIVES

The results of research work the action of viscosity of 1 % aqueous solution of polymer and functional group structure water-soluble polymers of domestic and foreign production on rheological properties of cement slurry are given.

Key words: water-soluble polymers, cellulose ethers, functional group structure of polymer yield strength, shear velocity gradient, plastic viscosity.

REFERENCES

1. Rakhimbaev, Sh.M. Regulation of technical properties of grouting mortars [Text] / Sh.M. Rakhimbaev. — Tashkent : Phan, 1976. — 159 p.
2. Оноприенко, Н.Н. Masonry mortars based on mineral binders with polymer additives : Author's Abstract of Dissertation... Cand. Sci. (Tech.) [Text] / N.N. Onoprienko. — Belgorod, 2004. — 23 p.

УДК 691.55:666.913.2

И.С. АЛЯМОВСКАЯ, Н.Е. ДАРИЕНКО, М.А. МИХЕЕНКОВ

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ α - И β -ПОЛУГИДРАТОВ
СУЛЬФАТА КАЛЬЦИЯ**

Проведен сравнительный анализ α - и β -полугидратов сульфата кальция. Показаны отличительные особенности каждой разновидности полугидрата сульфата кальция и возможность их получения в промышленных условиях.

Ключевые слова: сульфат кальция, α - и β -полугидраты, степень кристалличности.

В соответствии с классическими представлениями [1, 2] признается существование двух самостоятельных α - и β -модификаций полугидрата сульфата кальция, хотя самостоятельной модификацией вещества принято считать вещество, претерпевшее полиморфное превращение и отличающееся от исходного вещества кристаллическим строением. В то же время, по мнению многих исследователей, α - и β -полугидраты сульфата кальция не имеют различия в строении кристаллической решетки, которая при температуре менее 45 °С — ромбическая, псевдогексагональная, а при температуре более 45 °С — тригонально-трапецеидальная [3]. На каком же основании делаются выводы о различии α - и β -модификаций полугидрата сульфата кальция?

В научной литературе приводятся различия данных модификаций, которые можно классифицировать по способу получения, термодинамическим и технологическим свойствам, инфракрасным спектрам. Известны три основных способа получения полугидрата сульфата кальция: автоклавный (α -модификация), в солевом растворе (α -модификация), в варочных котлах и сушильных барабанах при атмосферном давлении (β -модификация).

К термодинамическим признакам относят температуру, при которой данные модификации теряют кристаллогидратную воду. У β -модификации потеря кристаллогидратной воды наблюдается при температуре 170...180 °С, а у α -модификации — при 200...210 °С [3].

К технологическим признакам относят:

- пониженную водопотребность α -модификации по сравнению с β -модификацией;
- более длительный период схватывания α -модификации;
- более высокие прочностные свойства α -модификации как следствие низкой водопотребности.

Следует отметить, что при равном водосодержании α - и β -модификации показывают равные прочностные свойства.

В работе [4] указывается на различие ИК-спектров поглощения α - и β -модификаций полугидрата сульфата кальция. Спектр β -модификации имеет четкую полосу поглощения около 1008 см⁻¹, обусловленную связью S–O, которая отсутствует у спектра α -модификации. По некоторым данным, спектр β -модификации имеет две полосы поглощения при 655 и 600 см⁻¹, а у α -модификации фиксируется только один мультиплет при 597 см⁻¹. Причины различия в данной работе не объясняются.

Таким образом, в качестве доказательств самостоятельного существования α - и β -модификаций полугидрата сульфата кальция приводятся не различия в строении кристаллов, а некий набор признаков различия без объяснения причин их возникновения.

Нами проведено комплексное обследование гипсов α - и β -модификаций с целью выявления их различия и возможности производства гипсов повышенной прочности с меньшими энергозатратами в промышленном масштабе. Для исследований были отобраны представительные пробы гипсов обеих модификаций. Исследовались гипсы: а) промышленного производства; б) лабораторного производства из искусственного гипсового камня, полученного промышленным прессованием фосфогипса; в) промышленного и лабораторного производств, выдержанные в эксикаторе в условиях насыщенного пара 24 ч. Маркировка исследованных проб и особенности их производства представлены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование проб, их состав и способ производства

№ пробы	Состав пробы гипса	Способ производства
1	α -модификация	Автоклавный промышленный
2	β -модификация	Лабораторное производство из искусственного гипсового камня, полученного промышленным прессованием фосфогипса
3	α -модификация	Автоклавный промышленный
4	α -модификация	Автоклавный промышленный
5	β -модификация	Промышленное производство в гипсоварочном котле
6	β -модификация	Выдержка 24 ч в эксикаторе пробы 2
7	β -модификация	Выдержка 24 ч в эксикаторе пробы 5

Все пробы исследовались с использованием рентгенофазового анализа (РФА), ИК-спектроскопии, дифференциально-термогравиметрического анализа (ДТГА), рН- и калориметрии.

Физико-химические свойства исследованных гипсов представлены в табл. 2 и 3. Результаты РФА приведены на рис. 1. В табл. 4 приведены относительные интенсивности наиболее ярких пиков исследованных гипсов.

Таблица 2

Физико-химические свойства исследованных гипсов

Наименование пробы	Насыпная плотность, кг/м ³	Истинная плотность, кг/м ³	Содержание СаО, %	Содержание SO ₃ , %	Содержание воды, %	
					свободной	кристаллогидратной
1 (α -гипс)	1025	2440	35,0	50,0	0,035	4,55
2 (β -гипс)	465	2325	38,17	54,53	0,09	4,57
3 (α -гипс)	1037	3125	37,3	53,39	0,064	5,2
4 (α -гипс)	1038	3128	38,52	55,04	0,017	4,88
5 (β -гипс)	930	2380	37,26	53,23	0,08	5,27
6 (β -гипс)	562	2321	36,84	52,64	1,22	5,09
7 (β -гипс)	1010	2385	37,62	53,74	1,39	5,48

Таблица 3

Физико-химические свойства исследованных гипсов

Наименование пробы	Предел прочности через 2 ч, МПа		Сроки схватывания, мин		Остаток на сите 0,2 мм, %	Водопотребность, %	Марка гипса
	сжатие	изгиб	начало	конец			
1 (α-гипс)	11,56	5,86	8,0	13,0	0,1	43,0	Г-10 Б III
2 (β-гипс)	2,76	2,34	11,0	21,0	2,9	61,0	Г-2 Б II
3 (α-гипс)	12,04	6,56	13,0	15,0	0,44	42,0	Г-10 Б III
4 (α-гипс)	9,92	5,39	12,0	21,0	0,15	41,0	Г-7 Б III
5 (β-гипс)	5,4	3,75	3,0	7,0	7,94	56,0	Г-5 А II
6 (β-гипс)	3,48	3,28	12,0	22,0	3,1	56,0	Г-3 Б II
7 (β-гипс)	6,92	4,68	4,0	8,0	7,1	47,0	Г-6 А II

Таблица 4

Результаты рентгенофазового анализа исследованных проб

Наименование пробы	Рентгеновская характеристика											
	<i>d</i> , Å	<i>I</i>	<i>d</i> , Å	<i>I</i>	<i>d</i> , Å	<i>I</i>	<i>d</i> , Å	<i>I</i>	<i>d</i> , Å	<i>I</i>	<i>d</i> , Å	<i>I</i>
1 (α-гипс)	5,9	64	3,44	53	2,97	100	2,78	9	2,12	5	1,83	8
2 (β-гипс)	5,9	63	3,44	66	2,98	100	2,78	61	2,12	23	1,84	47
3 (α-гипс)	5,9	53	3,44	45	2,98	100	2,78	24	2,12	8	1,84	14
4 (α-гипс)	5,9	61	3,44	48	2,98	100	2,78	8	2,12	8	1,84	9
5 (β-гипс)	5,9	57	3,44	63	2,98	100	2,78	33	2,12	19	1,84	31
6 (β-гипс)	5,9	76	3,44	70	2,98	100	2,78	67	2,12	25	1,84	44
7 (β-гипс)	5,9	64	3,44	51	2,98	100	2,79	36	2,12	16	1,84	28

Для определения степени кристалличности в соответствии с известной методикой¹

$$K = \frac{I_x / U_x}{I_0 / U_0} 100 \% \quad (1)$$

измерялись абсолютные значения интенсивности рентгеновских пиков и уширения их основания по данным РФА.

Здесь I_0 — эталонный рефлекс с наиболее яркой интенсивностью;

U_0 — основание линии наиболее яркого эталонного рефлекса;

U_x — основание рефлекса сравниваемой пробы;

I_x — интенсивность рефлексов сравниваемой пробы.

Степень кристалличности исследованных проб определялась по

Таблица 5

Степень кристалличности исследованных проб

Наименование пробы	Интенсивность рефлекса с $d = 5,9 \text{ \AA}$	Ширина рефлекса, Å	Степень кристалличности, %
1 (α-гипс)	1424	0,32	78
2 (β-гипс)	588	0,4	26
3 (α-гипс)	864	0,4	38
4 (α-гипс)	2054	0,36	100
5 (β-гипс)	478	0,4	21
6 (β-гипс)	530	0,32	29
7 (β-гипс)	544	0,36	30

¹ Болдырев В.В. Экспериментальные методы в механохимии твердых неорганических веществ. Новосибирск: Наука, 1983. 36 с.

рефлексу с межкристаллическим расстоянием $d = 5,9 \text{ \AA}$, в кристаллографическом направлении 10,0, в котором располагается кристаллогидратная вода. Наиболее яркую интенсивность данного рефлекса имеет проба 4, которая принята за эталон. Результаты расчета степени кристалличности по данной методике представлены в табл. 5.

Данные рентгеновских исследований проб свидетельствуют о том, что при учете относительной интенсивности наиболее ярких пиков пробы

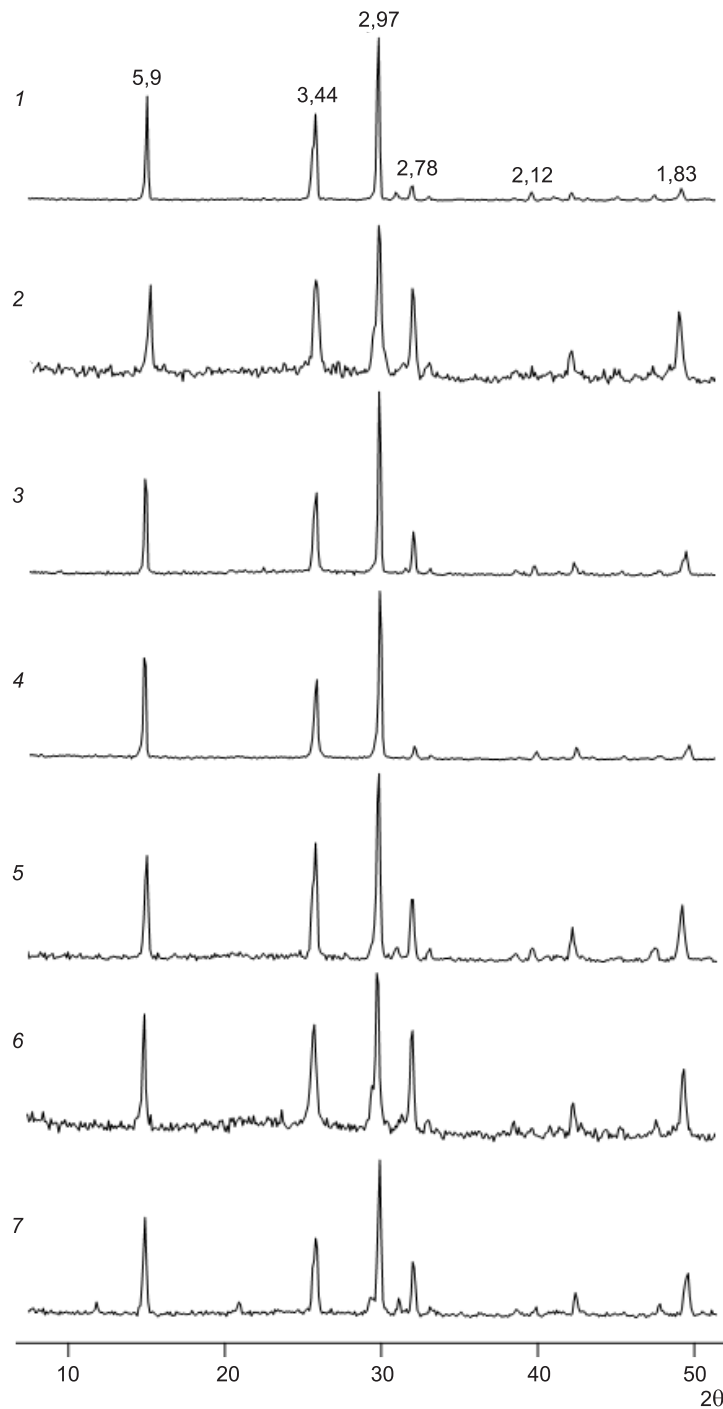


Рис. 1. Результаты рентгенофазового анализа исследованных проб

практически неразличимы, а при учете абсолютной интенсивности можно выявить пробы с большей степенью кристалличности. Все исследованные пробы α -модификации по степени кристалличности превосходят пробы β -модификации. После обработки проб β -модификации в эксикаторе степень их кристалличности незначительно повышается.

Результаты исследования проб методом ИК-спектроскопии представлены на рис. 2. В целом все спектры идентичны. Полоса поглощения кристаллогидратной воды при 1619 см^{-1} , характерная для деформационных

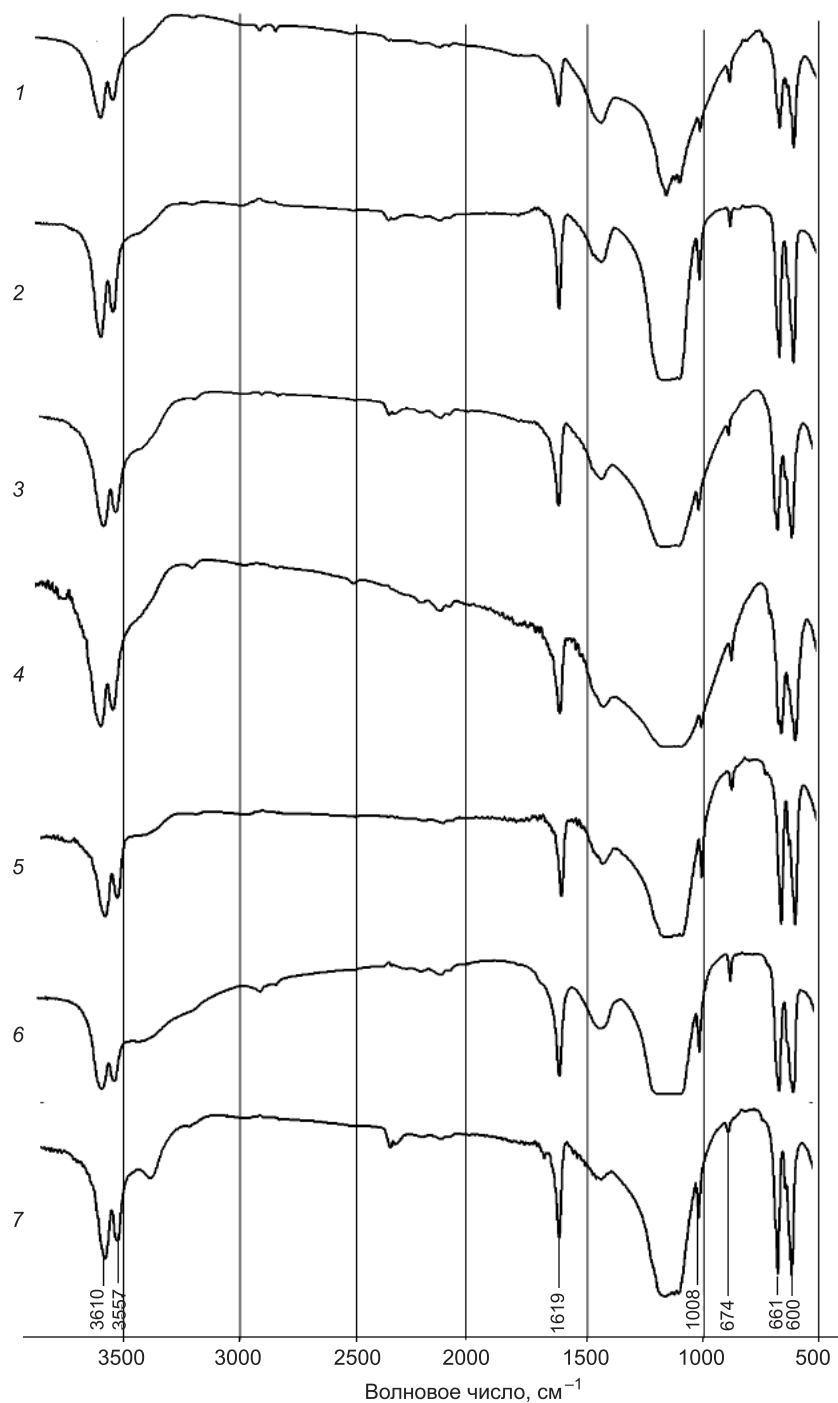


Рис. 2. Результаты ИК-спектроскопии исследованных проб

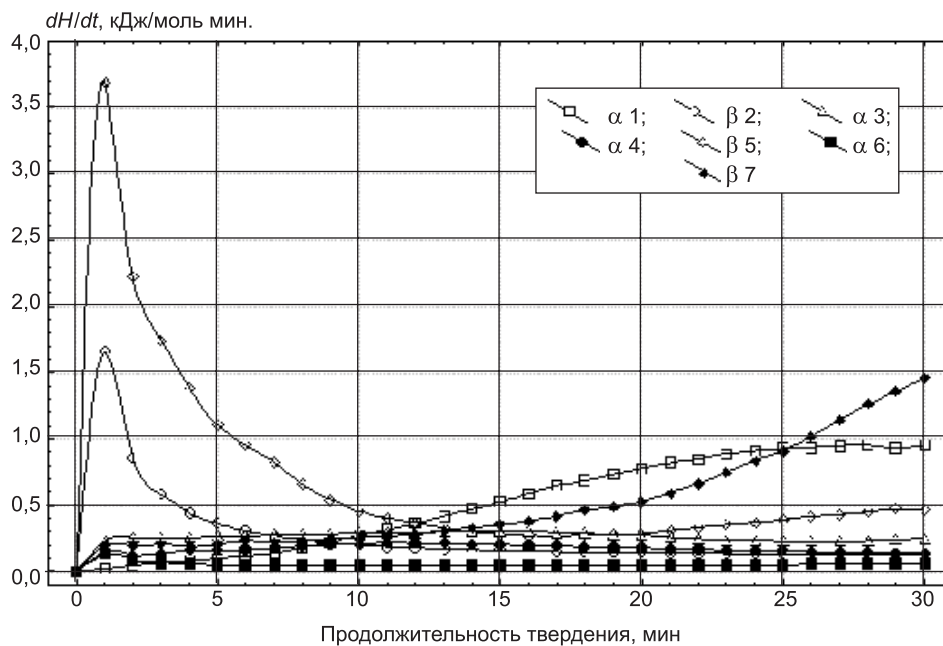


Рис. 3. Результаты calorиметрических исследований проб гипса (№ 1–7)

колебаний НОН, и полосы поглощения в диапазоне 3557 и 3610 см^{-1} , характерные для валентных колебаний группы ОН воды, идентичны у всех исследованных проб. У обеих разновидностей гипса фиксируются две полосы поглощения — при 661 и 600 см^{-1} , соответствующие деформационным колебаниям связи S–O, что не согласуется с данными работы [4], в которой утверждается, что у α -модификации фиксируется только одна полоса поглощения при 597 см^{-1} . Относительно полосы поглощения при 1008 см^{-1} , соответствующей валентным колебаниям связи S–O, можно отметить, что вопреки утверждениям работы [4] данная полоса фиксируется у обеих разновидностей, но у модификации α ее интенсивность слабее, чем у модификации β , причем после обработки паром интенсивность полосы уменьшается.

Результаты calorиметрических исследований представлены на рис. 3. Так, у проб гипсов β -модификации на начальном этапе гидратации отмечается более мощное, чем у α -модификации, тепловыделение, причем после обработки в эксикаторе они начинают выделять тепло точно так же, как и пробы α -модификации на начальном этапе гидратации. В табл. 6 приведена теплота гидратации исследованных проб.

Данные рН-метрии (рис. 4) показывают, что у гипсов β -модификации на начальном этапе гидратации величина рН го-

Таблица 6

Теплота гидратации исследованных проб

Наименование пробы	Теплота гидратации, кДж/моль (кДж/кг)	Теплота гидратации [1], кДж/кг
1 (α -гипс)	9,16 (63,172)	41,99
2 (β -гипс)	7,76* (53,517)	47,12
3 (α -гипс)	11,61(80,068)	41,99
4 (α -гипс)	11,10(76,551)	41,99
5 (β -гипс)	11,11**(76,620)	47,12
6 (β -гипс)	7,04(48,551)	—
7 (β -гипс)	10,86(74,896)	—

* Снижение теплоты гидратации после выдержки в эксикаторе на $0,72\text{ кДж/моль}$.

** Снижение теплоты гидратации после выдержки в эксикаторе на $0,75\text{ кДж/моль}$.

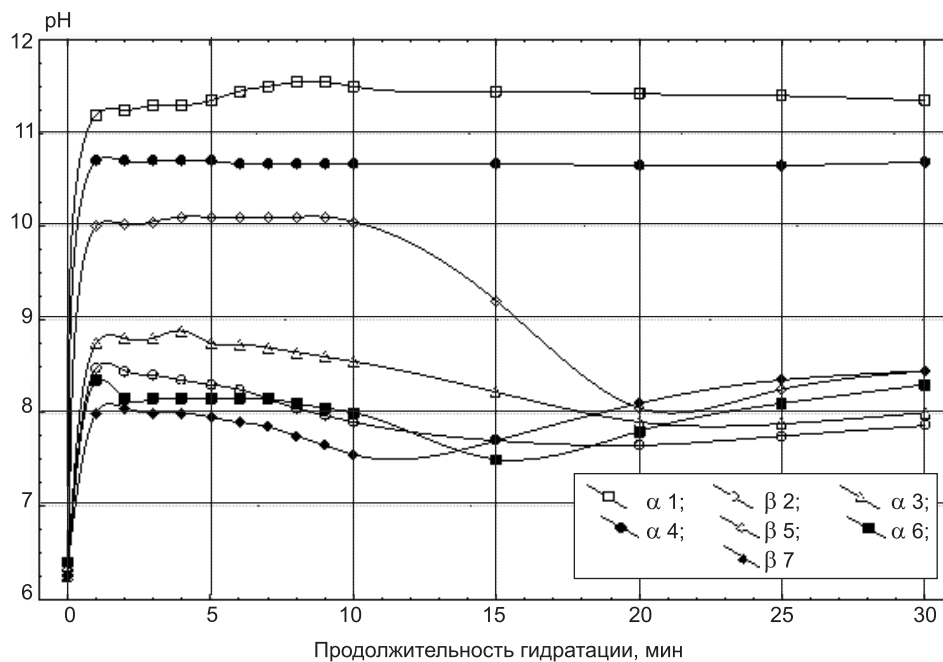


Рис. 4. Результаты рН-метрии исследованных проб гипса (№ 1–7)

раздо выше, чем у проб гипсов обеих модификаций после обработки паром в эксикаторе.

На рис. 5 и 6 приведены результаты ДТГА для пробы 1, а в табл. 7 — сводные результаты всех исследованных гипсов.

Результаты испытаний не подтверждают существенного различия температур потери кристаллогидратной воды у гипсов обеих модификаций.

Анализ результатов исследований свидетельствует о том, что рентгенограммы обеих разновидностей гипсов практически не различаются, за исключением степени кристалличности. Это объясняется различием способов их производства. При производстве α -гипсов в условиях автоклавной обработки кристаллогидратная вода покидает кристаллическую решетку в капельно-жидком состоянии и не деформирует решетку, а при производстве β -модификации — в парообразном состоянии, приводя к деформации решетки. Данные ДТГА не фиксируют существенного различия у всех исследованных гипсов температур полной потери кристаллогидратной воды. По данным ИК-спектроскопии, у α -модификации можно отметить меньшую интенсивность полосы поглощения при 1008 см^{-1} , соответствующей валентным колебаниям связи S–O. Калориметрические исследования показывают, что у

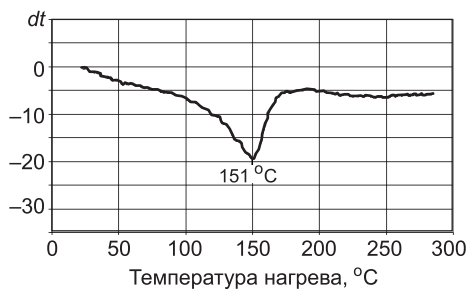


Рис. 5. Результаты дифференциально-термического анализа пробы 1

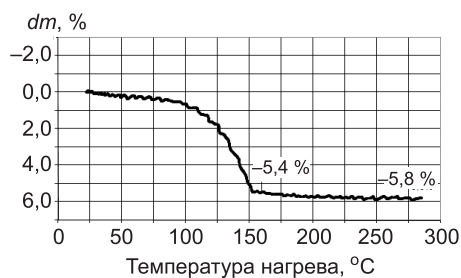


Рис. 6. Результаты термогравиметрического анализа пробы 1

Таблица 7
Результаты исследования проб при помощи ДТГА

Наименование пробы	Температура потери кристаллогидратной воды, °С	Потеря массы при температуре эндозффекта, %	Потеря массы до 100 °С, %
1 (α-гипс)	171	5,4	0,64
2 (β-гипс)	168	6,5	1,4
3 (α-гипс)	172	4,3	0
4 (α-гипс)	168	5,5	0,67
5 (β-гипс)	171	5,6	0,56
6 (β-гипс)	168	5,7	1,4
7 (β-гипс)	171	6,0	0,79

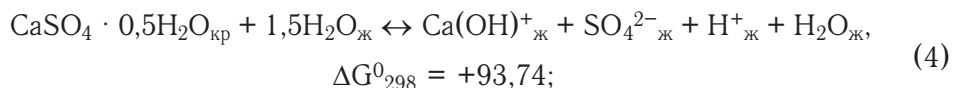
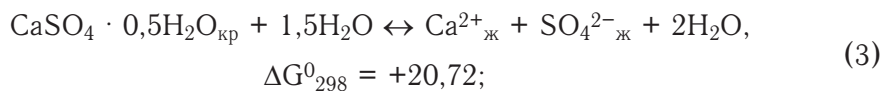
гипсов β-модификации на начальном этапе гидратации большее энерговыделение. После обработки гипсов β-модификации паром в эксикаторе они показывают такое же энерговыделение, как и гипсы α-модификации.

У гипсов β-модификации на начальном этапе гидратации рН выше, чем у гипсов α-модификации. Гипсы β-модификации, обработанные па-

ром в эксикаторе, показывают меньшую величину рН.

По результатам комплексного исследования гипсов обеих модификаций можно сделать вывод, что их различие состоит в основном в форме оксида кальция, входящего в молекулу гипса, — оксида или гидроксида. Поскольку способ производства α-модификации можно условно назвать мокрым, а β-модификации — сухим, то, вероятно, этим обстоятельством и предопределены различия этих гипсов. Сложность промышленного производства α-модификации мокрым способом заключается в необходимости немедленного удаления свободной воды при извлечении гипса из автоклава или соляной ванны, иначе сразу начнется процесс гидратации. При производстве β-модификации необходимости в срочном удалении свободной воды нет, так как она практически полностью удаляется при варке гипса. Сложно предположить, что при производстве гипса α-модификации свободная вода удаляется мгновенно, не оказывая никакого влияния на формирующуюся структуру гипса. По-видимому, свободная вода вступает в хемосорбционное взаимодействие с формирующейся молекулой гипса полугидрата. Такое предположение позволяет объяснить все наблюдаемые в данном исследовании явления. Главным образом данное обстоятельство влияет на все эффекты, происходящие на начальном этапе гидратации гипсов. Следует отметить, что ионно-энергетические эффекты на начальном этапе гидратации полуводного сульфата кальция еще недостаточно полно исследованы.

В работе Е.В. Кондращенко² изучены процессы гидратации полугидрата сульфата кальция и приведены ионные равновесные реакции растворения полугидрата и его гидролиза:



² Кондращенко Е.В. Гипсовые строительные материалы повышенной прочности и водостойкости (физико-химические и энергетические основы): Дис. ... д-ра техн. наук. Харьков, 2004.



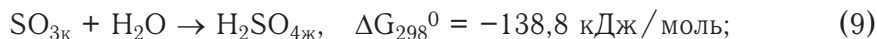
Автор указывает, что наиболее важной реакцией растворения гипса является реакция (2), при протекании которой образуются молекулы гидратированного гипса. Однако свободная энергия Гиббса в данной реакции в стандартном состоянии положительна, а это означает, что ее протекание при нормальной температуре термодинамически невозможно. Невозможно также протекание в стандартных условиях и других приведенных автором реакций, приводящих к образованию в растворе ионов Ca^{2+} , $\text{Ca}(\text{OH})^+$, SO_4^{2-} , HSO_4^- , H^+ , OH^- .

Объяснить ионно-энергетические явления, происходящие на начальном этапе гидратации, можно только с учетом хемосорбции. Наиболее детально эти процессы изучены в работе В.В. Капанова³, где рассмотрены процессы гидратации с учетом хемосорбции на примере гидратации молекулы CaO . По В.В. Капанову, процессы гидратации CaO протекают в такой последовательности:

- 1) адсорбция молекулы H_2O на CaO ;
- 2) разрыв молекулы $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$ с одновременным образованием связей $\text{OH}^- - \text{Ca}^{2+}$ и $\text{H}^+ - \text{O}^{2-}$;
- 3) электронный переход от OH^- к Ca^{2+} с образованием CaOH^+ ;
- 4) электронный переход от O^{2-} к H^+ с образованием OH^- ;
- 5) отрыв образовавшихся ионов и выход их в раствор.

При переносе данных положений на молекулу $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ с учетом того, что в ней молекула CaO через кислород связана с SO_3 , становится возможным описание ионно-энергетических эффектов, происходящих при гидратации гипса.

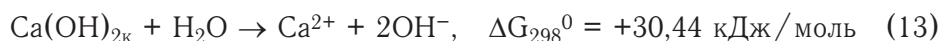
На начальном этапе гидратации гипса могут протекать процессы, описываемые следующими неравновесными ионными уравнениями:



Как видно из приведенных данных, протекание этих реакций, кроме реакции (6), термодинамически возможно при нормальной температуре. В случае воздействия газообразной воды с молекулой CaO будут происходить процессы, описанные В.В. Капановым, до образования ионной пары CaOH^+ и OH^- без выхода их в раствор. Применительно к молекуле гипса естественно, что за счет перераспределения электрона между O^{2-} и H^+ при образовании OH^- связь кислорода с сернокислотным тетраэдром исчезает. Поскольку в молекуле гипса полугидрата таких связей две и вторая связь не исчезает, то на ИК-спектре интенсивность этой связи уменьшится. В условиях формирования α -полугидрата этот процесс возможен, а в условиях формирования β -полугидрата — нет. В молекуле полугидрата одна молекула кристаллогидратной воды связывает две молекулы CaSO_4 , расположенные по разные стороны межкристаллической зоны, в которой располагается кристаллогидратная вода. При этом CaO на одной стороне зоны через молекулу воды связана с сернокислотным тетраэдром на противоположной стороне и находится в термодинамиче-

³ Капанов В.В. Твердение вяжущих веществ и изделий на их основе. Челябинск, 1976. Silast@mail.ru

ски устойчивом состоянии. СаО на противоположной стороне не является термодинамически устойчивой и в присутствии газообразной или жидкой воды может вступать с ней в реакцию по схеме, описанной выше, с образованием Са(ОН)₂. Этим объясняются все наблюдаемые эффекты. В молекуле α-полугидрата существует Са(ОН)₂, а в молекуле β-полугидрата — СаО, при этом в первые минуты гидратации у β-полугидрата возможно протекание реакций (7) и (8) с выделением гидроксида ОН⁻, вызывающего увеличение значения рН. В молекуле α-полугидрата протекание диссоциации гидроксида кальция Са(ОН)₂ по схемам



термодинамически при нормальной температуре невозможно, поэтому на начальном этапе гидратации будут протекать реакции (9)–(11) с выделением Н⁺ и подкислением среды.

При прочих равных условиях при протекании реакции (8) тепловой эффект больше теплового эффекта реакции (13), поэтому при гидратации β-полугидрата фиксируется большее выделение тепла. При выдержке β-полугидрата в эксикаторе он начинает вести себя как α-полугидрат.

На возможность существования адсорбционной воды в каналах кристаллической структуры гипса указывалось в работе [4], при этом методами ядерно-магнитного резонанса было установлено, что молекулы адсорбционной воды α-полугидрата менее подвижны, чем β-полугидрата. Вероятнее всего, сравниваемые полугидраты отличаются степенью покрытия поверхности адсорбированными молекулами воды и энергией связи воды. В случае α-полугидрата — хемосорбционная связь, в случае β-полугидрата — сорбционная. Этим объясняется меньшая подвижность молекул сорбционной воды у α-полугидрата.

Вторым, наиболее значимым признаком, отличающим рассматриваемые разновидности гипса, является различие их кристаллов. В литературных источниках на данное различие указывается по-разному. В одних случаях отмечается, что кристаллы α-модификации имеют меньшую удельную поверхность. В других, что кристаллы α-модификации более крупные и плотные, а β-модификации — рыхлые и волокнистые. Как указывалось выше, данные различия являются следствием различия способов производства. У α-модификации при термообработке вода удаляется в капельно-жидком состоянии, а у β-модификации — в парообразном. Это сказывается на структуре кристалла и приводит у α-модификации к меньшей водопотребности и высокой прочности гипсовых отливок, а у β-модификации соответственно к большей водопотребности и меньшей прочности гипсовых отливок. При проведении сравнительных испытаний мы выразили свойства кристаллов рассматриваемых разновидностей гипса обобщенным показателем — степенью кристалличности. Установлено, что гипсы α-модификации имеют степень кристалличности выше, чем β-модификации. Ранее нами было установлено⁴, что при прессовании природных гипсов температура эндоэффекта относительно непрессованных увеличивается и ее максимальное значение соответствует повышенной зоне кристалличности, что объясняет факт, описанный в литературе, что температура начала выделения водяных паров у α-полугидрата выше, чем у β-полугидрата.

⁴ Михеенков М.А. Прессование как способ повышения физико-механических свойств гипсового вяжущего // Вестник МГСУ. 2009. № 3. С. 173–182.

Полученные результаты позволяют рассмотреть возможность получения высокопрочного гипса, являющегося аналогом α -модификации, без применения автоклавной обработки. В ряде работ⁵ нами указывалось, что прессование гипса при различных давлениях приводит к изменению степени кристалличности кристаллогидратов гипса и образованию более плотных кристаллогидратов с пониженной водопотребностью. Это объясняется накоплением дефектов в кристаллах и снижением степени дефектности при разрушении кристаллов при давлениях прессования, соответствующих пределу прочности кристаллогидратов. Именно при давлениях, соответствующих пределу прочности кристаллогидратов, и наблюдается повышенная степень кристалличности. Гипсы, обработанные при данных давлениях, показывают более высокую прочность, более высокое тепловыделение при гидратации и сокращенные сроки схватывания. При обработке таких гипсов острым паром, или выдержке в условиях насыщенного пара, снижаются их водопотребность и тепловыделение при гидратации, увеличиваются сроки схватывания. Гипсы β -модификации, полученные по данной технологии, являются практически полными аналогами гипсов α -модификации. Следует отметить, что наиболее высокую прочность удается получить при прессовании гипсов с более крупными кристаллогидратами, в частности фосфогипсов, полученных дегидратным способом. Так, в лабораторных условиях на основе фосфогипса, полученного дегидратным способом, при использовании описанной технологии получен гипс-полугидрат прочностью 19 МПа.

Выводы. 1. Результаты сравнительных испытаний гипсов-полугидратов α - и β -модификаций свидетельствуют о том, что они имеют абсолютно одинаковое кристаллическое строение и рентгенографически не различимы.

2. По мнению авторов, данные разновидности гипса различаются в основном степенью кристалличности их кристаллогидратов и типом молекулы оксида кальция, находящегося в межкристаллической зоне. У β -модификации это оксид кальция, а у α -модификации — гидроксид кальция. Такие различия, по мнению авторов, не позволяют считать их самостоятельными модификациями гипса.

3. Используя результаты данной работы, в лабораторных условиях из гипса β -модификации удастся получить полный аналог гипса α -модификации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Keelly, K.K. Thermodynamic properties of gypsum and its dehydration products [Текст] / K.K. Keelly, J.C. Southard, C.T. Anderson. — U.S. Gov. print office W., 1941. — Bureau of Miner. — Techn. paper № 265.
2. Волженский, А.В. Гипсовые вяжущие и изделия [Текст] / А.В. Волженский, А.В. Ферронская. — М., 1974. — 328 с.
3. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение) / Под общ. ред. А.В. Ферронской. — М. : Изд-во АСВ, 2004. — 488 с.
4. Горшков, В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ [Текст] / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. — М. : Высш. шк., 1981. — 335 с.

АЛЯМОВСКАЯ И.С., ст. препод.

Уральский государственный технический университет — УПИ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

⁵ Михеенков М.А. Особенности механической активации гипса в условиях динамического прессования // Электронный журнал «Исследовано в России». 2004. Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/127.pdf>

ДАРИЕНКО Н.Е., ст. препод.

Уральский государственный технический университет — УПИ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

МИХЕЕНКОВ М.А., канд. техн. наук, доц.

Уральский государственный технический университет — УПИ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург

Получено после доработки 22.06.10

Alyamovskaya I.S., senior lecturer, Ural State Technical University — UPI named of the first President of Russia B.N. Eltsin, Ekaterinburg, Russia

Darienko N.E., senior lecturer, Ural State Technical University — UPI named of the first President of Russia B.N. Eltsin, Ekaterinburg, Russia

Miheenkov M.A., candidate of technical sciences, assistant professor, Ural State Technical University — UPI named of the first President of Russia B.N. Eltsin, Ekaterinburg, Russia

THE COMPARATIVE ANALYSIS α - AND β -SEMIHYDRATES OF SULFATE OF CALCIUM

The comparative analysis α - and β -semihydrates of sulphate of calcium is carried out. Distinctive features of each version of semihydrate of sulphate of calcium and possibility of their reception in industrial conditions are shown.

Key words: sulfate of calcium, α - and β -semihydrates, a crystal's degree.

REFERENCES

1. Keelly, K.K. Thermodynamic properties of gypsum and its dehydration products [Text] / K.K. Keelly, J.C. Southard, C.T. Anderson. — U.S. Gov. print office W., 1941. — Bureau of Miner. — Techn. paper N 265.
2. Volzhensky, A.V. A gypsum binder and its products [Text] / A.V. Volzhensky, A.V. Ferronskaya. — M., 1974. — 328 p.
3. Gypsum binders and products (manufacture and application) / Ed. A.V. Ferronskaya. — M.: Publ. House ASV, 2004. — 488 p.
4. Gorshkov, V.S. Methods of the physical and chemical analysis of knitting substances [Text] / V.S. Gorshkov, V.V. Timashev, V.G. Savelyev. — M.: Higher School, 1981. — 335 p.

УДК 691.51/55:666.941.2

В.Н. ЗЫРЯНОВА, Е.В. ЛЫТКИНА, Г.И. БЕРДОВ

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ЗАТВОРИТЕЛЯ НА СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ

Исследовано влияние вводимых в состав водного затворителя солей с многозарядными катионами (Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+}) на свойства композиционных вяжущих веществ, содержащих 70 мас. % волластонита или диопсида. Показано, что введение в состав затворителя 5 мас. % $FeCl_3$, $CrCl_3$, $NH_4Fe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ способствует значительному увеличению прочности образцов, особенно в ранние сроки твердения (7 сут).

Ключевые слова: магнезиальные вяжущие вещества, электролиты с многозарядными катионами, волластонит, диопсид, плотность, механическая прочность.

Магнезиальные вяжущие вещества, получаемые из магнезита или доломита (каустический магнезит, каустический доломит), имеют несомненные положительные качества, к числу которых можно отнести достаточно высокую механическую прочность, нейтральный химический состав продуктов твердения. Наряду с этим они обладают малой водостойкостью и имеют большую усадку при твердении, что ограничивает их использование в строительстве.

Увеличение водостойкости и механической прочности магнезиальных вяжущих веществ обеспечивается введением в их состав минеральных добавок (наполнителей), к числу которых относятся природные силикатные материалы (диопсид, волластонит). Добавка 70 мас. % волластонита, диопсида обеспечивает значительное повышение механической прочности и водостойкости продуктов твердения магнезиальных вяжущих [1–3]. Природные силикаты, воздействуя на процесс гидратации MgO , активируют кристаллизацию новообразований, способствуют формированию водостойкого и прочного модифицированного тригидроксохлорида магния.

Реакции, протекающие при гидратации магнезиальных вяжущих, и состав новообразований, несомненно, зависят от состава затворителя.

При введении электролитов в воду затворения значительную роль может играть ионный обмен — замещение катионов в структуре MgO или наполнителя ионами из раствора.

Способность ионов, содержащихся в твердом теле, к обмену с ионами из растворов солей зависит от ряда факторов, в том числе от заряда и размеров обменивающихся ионов. В рассматриваемом случае возможен гетеровалентный ионный обмен. Он осуществляется в порядке рядов, соответствующих диагоналям периодической системы Д.И. Менделеева. Компенсация зарядов обеспечивается за счет количества обменивающихся ионов и сопровождается возникновением вакансий в кристаллической решетке твердого тела. Ионы с большими зарядами

легче входят в кристаллическую решетку, чем ионы меньших зарядов взамен многозарядных.

При введении в состав композиционных магнезиальных вяжущих веществ в качестве наполнителей волластонита или диопсида основными ионами, входящими в состав как MgO , так и вводимых добавок, являются ионы Mg^{2+} и Ca^{2+} . При протекании возможного ионного обмена предпочтителен более высокий заряд иона в растворе и равный или меньший его ионный радиус по сравнению с ионами твердой фазы (Mg^{2+} и Ca^{2+}). Эти радиусы для Mg^{2+} составляют 0,074 нм, для Ca^{2+} — 0,104 нм. Из числа многозарядных катионов близкие или меньшие значения ионного радиуса имеют: Al^{3+} — 0,057 нм, Fe^{3+} — 0,067 нм, Cr^{3+} — 0,064 нм. Эти ионы активно участвуют в ионообменном взаимодействии с силикатами магния и кальция, например форстеритом $2MgO \cdot SiO_2$, двухкальциевым $2CaO \cdot SiO_2$ и трехкальциевым $3Ca \cdot SiO_2$ силикатами [4].

В данной работе исследовано влияние солей, введенных в состав затворителя, на гидратационное твердение и свойства композиционных магнезиальных вяжущих веществ. В качестве добавок композиционные вяжущие вещества содержали 70 мас. % волластонита или диопсида [1, 2]. Использовался измельченный волластонит Синюхинского месторождения (рудник «Веселый», республика Алтай) и диопсид, представляющий собой измельченную породу из отвалов Алданского месторождения флогопитовых руд [2].

Для затворения смеси использовали раствор хлорида магния с плотностью 1,2 г/см³. Соотношение $MgO : MgCl_2$ в тесте принималось таким, чтобы нормальная густота теста была примерно одинаковой и равной 48–52 %, что соответствует синтезу стабильных гидроксохлоридов магния. Из теста формовались образцы размером 2×2×2 см, которые твердели на воздухе в течение 1, 7, 28 и более суток. После этого образцы испытывались для определения предела прочности при сжатии, плотности и водостойкости.

При приготовлении композиционных магнезиальных вяжущих MgO и добавки смешивались в соотношении 30 : 70 % и затворялись раствором хлорида магния до влажности смеси 50–80 %.

Для введения в воду затворения взяты хорошо растворимые соли с многозарядными катионами алюминия, железа, хрома: $AlCl_3$, $FeCl_3$, $CrCl_3$, $NH_4Fe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$. Они вводились в воду затворения в количестве 5 мас. %. В случае $NH_4Fe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ расчет концентрации проводился по безводной форме.

Результаты исследования влияния растворов солей на свойства композиционного магнезиального вяжущего, содержащего 70 мас. % волластонита, представлены в табл. 1. Для оценки упрочняющего действия добавок солей приведено отношение прочности опытных образцов к прочности аналогичных контрольных образцов, твердевших без введения солей в затворитель (коэффициент упрочнения). Абсолютные величины

Таблица 1
Влияние растворов солей на свойства образцов композиционного магнезиального вяжущего, содержащего 70 мас. % волластонита

Соль	Средняя плотность, г/см ³		Относительная прочность при сжатии, МПа ($R_{оп}/R_{контр}$)	
	7 сут	28 сут	7 сут	28 сут
—	1,46	1,45	1,00	1,00
$AlCl_3$	1,48	1,43	1,50	0,60
$FeCl_3$	1,44	1,41	2,75	1,05
$CrCl_3$	1,46	1,42	3,60	2,13
$NH_4Fe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	1,41	1,37	1,50	1,75

прочности композиционных магниезальных вяжущих веществ приведены в работах [1, 2].

Изменение плотности образцов при введении исследованных солей в воду затворения при твердении на воздухе невелико. Можно отметить некоторое снижение плотности. Значительно большее влияние соли оказывают на прочность образцов, особенно в ранние сроки гидратационного твердения (7 сут). Так, при введении в воду затворения солей железа и хрома (FeCl_3 , CrCl_3 , $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) прочность после семи суток твердения увеличивается в 1,5–3,6 раза. В случае солей CrCl_3 и $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ эффект сохраняется и к 28 сут твердения. При этом увеличение прочности по сравнению с образцами без солей составляет 60–70 %.

При действии AlCl_3 к 28 сут отмечено некоторое понижение прочности. Изменение соотношения прочности опытных и контрольных образцов в возрасте 7 и 28 сут связано, по-видимому, с особенностями гидратационного твердения магниезального вя-

жущего при введении добавок электролитов. Наибольшее их ускоряющее действие соответствует начальным срокам твердения (7 сут). Влияние добавки $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ (увеличение прочности при некотором снижении плотности) может быть обусловлено присутствием сульфат-ионов SO_4^{2-} .

Таким образом, введение в воду затворения солей CrCl_3 , $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ способствует значительному увеличению прочности композиционного вяжущего, содержащего 70 % волластонита, как в возрасте 7, так и в возрасте 28 сут при твердении на воздухе.

В случае композиционных магниезальных вяжущих, содержащих 70 мас. % диопсида, как и в предыдущем случае, можно отметить тенденцию к некоторому снижению плотности образцов при введении солей в воду затворения (табл. 2).

Прочность при сжатии образцов в возрасте 7 сут (табл. 2) увеличивается при введении исследованных солей в воду затворения. Наиболее существенно это увеличение в случае введения AlCl_3 , $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Оно составляет 40–80 %. После 28 сут твердения на воздухе при введении в воду затворения исследованных солей отмечено снижение прочности по сравнению с контрольными образцами.

Увеличение прочности в ранние сроки твердения связано с влиянием вводимых солей на процесс гидратации MgO и формирование структур твердения.

Определенное влияние введение соли может оказывать и на минеральные добавки — волластонит и диопсид. Возможно их ионообменное взаимодействие с катионами солей, а также проявление гидравлической активности минеральных добавок.

Для интенсификации взаимодействия минеральных добавок (волластонита, диопсида) с растворами солей образцы порошков волластонита

Таблица 2

Влияние растворов солей на свойства образцов композиционного магниезального вяжущего, содержащего 70 мас. % диопсида

Соль	Средняя плотность, г/см ³		Относительная прочность при сжатии, МПа ($R_{оп}/R_{контр}$)	
	7 сут	28 сут	7 сут	28 сут
—	1,50	1,53	1,00	1,00
AlCl_3	1,44	1,35	1,77	0,54
FeCl_3	1,48	1,49	1,13	0,67
CrCl_3	1,45	1,30	1,37	0,60
$\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	1,44	1,38	1,60	0,72

и диопсида кипятили в течение 1 ч в 10%-ных водных растворах рассматриваемых солей, затем высушивали и вводили в состав композиционного вяжущего. При этом соли в воду затворения дополнительно не вводились. Таким образом, оценивалось возможное влияние изменения структуры и состава минеральных добавок на свойства композиционных вяжущих веществ. В контрольной партии образцов использовались порошки волластонита и диопсида, не подвергавшиеся кипячению в растворах солей. Эффект упрочнения оценивался по отношению прочности образцов, содержащих обработанные в растворах солей минеральные добавки, к прочности таких же образцов, содержащих добавки в исходном состоянии.

Рассмотренная выше обработка порошка волластонита в растворах солей обеспечивает повышение механической прочности образцов на начальной стадии твердения, кроме обработки в растворе $AlCl_3$ (табл. 3). Это увеличение составляет от 70 до 130 %. Однако оно меньше, чем в случае, когда соли вводились непосредственно в воду затворения.

Таблица 3

Влияние обработки волластонита в кипящих водных растворах солей на свойства композиционного магниезального вяжущего

Соль	Средняя плотность, г/см ³		Относительная прочность при сжатии, МПа ($R_{оп}/R_{контр}$)	
	7 сут	28 сут	7 сут	28 сут
—	1,44	1,41	1,00	1,00
$AlCl_3$	1,47	1,47	0,67	0,70
$FeCl_3$	1,43	1,39	2,09	1,08
$CrCl_3$	1,46	1,42	1,72	1,60

Таблица 4

Влияние обработки диопсида в кипящих водных растворах солей на свойства композиционного магниезального вяжущего

Соль	Средняя плотность, г/см ³		Относительная прочность при сжатии, МПа ($R_{оп}/R_{контр}$)	
	7 сут	28 сут	7 сут	28 сут
—	1,49	1,56	1,00	1,00
$AlCl_3$	1,41	1,39	0,86	0,33
$FeCl_3$	1,50	1,47	1,83	0,47
$CrCl_3$	1,53	1,48	0,69	0,80
$NH_4Fe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	1,46	1,38	1,79	0,65

В возрасте 28 сут более высоким по сравнению с контрольным значением уровня прочности обладают образцы, обработанные в растворе $CrCl_3$ и $NH_4Fe(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$. В последнем случае увеличение прочности составляет от 30 до 120 %. Значения механической прочности образцов в возрасте 28 сут примерно одинаковы как при введении солей в воду затворения, так и при обработке минералов в кипящих водных растворах солей, однако последний способ значительно более трудоемок и энергозатратен. При этом после твердения в воде в течение 90 сут значения прочности образцов, содержащих добавку, обработанную в кипящих растворах солей, существенно меньше, чем у контрольного состава и составов, у которых соли вводились в воду затворения.

Как и в случае введения добавки волластонита, при использовании в составе композиционного магниезального вяжущего диопсида, обработанного в кипящих водных растворах солей, после 7 сут твердения на воздухе во многих случаях прочность повышается по сравнению с контрольными образцами. Однако это увеличение меньше, чем в случае использования волластонита.

После 28 сут твердения на воздухе прочность образцов, содержащих обработанный в растворах солей диопсид, во всех случаях меньше, чем у контрольного состава.

Таким образом, введение в воду затвердения солей, содержащих многозарядные катионы (Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+}), оказывает упрочняющее действие при твердении композиционных магнезиальных вяжущих, содержащих 70 мас. % измельченного волластонита или диопсида, особенно в начальные (7 сут) сроки гидратации. Наиболее эффективно действие 5%-ных добавок CrCl_3 и $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. При этом в случае композиционного магнезиального вяжущего, содержащего 70 мас. % волластонита, прочность образцов в возрасте 7 сут увеличивается в 1,5–3,6 раза, в возрасте 28 сут — на 70 % и более. Действие обработанных в кипящих водных растворах солей добавок волластонита и диопсида менее эффективно. Очевидно, преобладающее влияние в процессе твердения композиционных магнезиальных вяжущих вводимые из раствора трехзарядные катионы оказывают на само магнезиальное связующее и в меньшей мере на минеральный наполнитель. Это воздействие может быть обусловлено гетеровалентным обменом ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} на ионы Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} из раствора, например: $3\text{Mg}^{2+} \leftrightarrow 2\text{Fe}^{3+}$. В результате этого создаются вакансии ионов в структуре твердого тела, приводящие к повышению гидратационной активности магнезиальных вяжущих веществ, особенно в ранние сроки твердения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Верещагин, В.И. Водостойкие смешанные магнезиальные вяжущие [Текст] / В.И. Верещагин, В.Н. Смирнская, С.В. Эрдман // Стекло и керамика. — 1997. — № 11. — С. 33–37.
2. Зырянова, В.Н. Повышение механической прочности и водостойкости магнезиальных вяжущих веществ при введении минеральных заполнителей [Текст] / В.Н. Зырянова, Е.В. Лыткина, Г.И. Бердов // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 3. — С. 21–26.
3. Зырянова, В.Н. Композиционные магнезиально-диопсидовые вяжущие материалы из механически активированных диопсидов [Текст] / В.Н. Зырянова, Г.И. Бердов, В.И. Верещагин, Е.В. Эрдман // Изв. вузов. Строительство. — 2007. — № 4. — С. 28–31.
4. Бердов, Г.И. Взаимодействие керамики с растворами солей [Текст] / Г.И. Бердов, Л.В. Осина, О.С. Мадзаева // Стекло и керамика. — 1987. — № 10. — С. 21–22.

ЗЫРЯНОВА В.Н., канд. техн. наук, доц.; E-mail: VNZyr@mail.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ЛЫТКИНА Е.В., асп.; E-mail: jenny_lytkina@rambler.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

БЕРДОВ Г.И., д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 15.05.10

Zyryanova V.N., candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: VNZyr@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Lytkina E.V., post-graduate student; E-mail: jenny_lytkina@rambler.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Berdov G.I., doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

STRUCTURE INFLUENCE SLAKING ON PROPERTIES COMPOSITE MAGNESIALE KNITTING SUBSTANCES

Influence entered into structure water slaking salts of aluminium, iron, chrome (Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+}) on properties of the composite knitting substances containing 70 mas. % is investigated wollastonite or diopside. It is shown that introduction in structure slaking 5 % of weights FeCl_3 , CrCl_3 , $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ promotes substantial growth of durability of samples, especially in early terms hardening (7 days).

Key words: magnesial knitting substances, wollastonit, diopsid, density, mechanical durability.

REFERENCES

1. Vereschagin, V.I. Waterproof mixed magnesial knitting [Text] / V.I. Vereschagin, V.N. Smirenskaya, S.V. Erdman // Glass and ceramics. — 1997. — N 11. — P. 33–37.
2. Zyryanova, V.N. Increase of mechanical durability and water resistance magnesial knitting substances at introduction of mineral fillers [Text] / V.N. Zyryanova, E.V. Lytkina, G.I. Berdov // News of higher educational institutions. Construction. — 2010. — N 3. — P. 21–26.
3. Zyryanova, V.N. Composite magnezial-diopsidov knitting materials from mechanically activated diopside [Text] / V.N. Zyryanova, G.I. Berdov, V.I. Vereschagin, E.V. Erdman // News of higher educational institutions. Construction. — 2007. — N 4. — P. 28–31.
4. Berdov, G.I. Interaction of ceramics with solutions of salts [Text] / G.I. Berdov, L.V. Osinova, O.S. Madzaeva // Glass and ceramics. — 1987. — N 10. — P. 21–22.

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 627.84.001.24

Л.Н. ГАХОВА, Ю.А. КУЗНЕЦОВА

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ТУРБИННЫХ ВОДОВОДАХ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Приводятся постановка задачи о напряженно-деформированном состоянии и расчет напряжений методом граничных интегральных уравнений на примере сталежелезобетонных водоводов Саяно-Шушенской ГЭС. Тестирование полученных решений для кусочно-однородных областей проводилось на известных решениях. Расчет напряжений выполнен без учета температурных воздействий.

Ключевые слова: сталежелезобетонные турбинные водоводы, напряженно-деформированное состояние, метод граничных интегральных уравнений.

Для расчета напряженного состояния сталежелезобетонных турбинных водоводов используется решение теории упругости для кусочно-однородных областей, которое основывается на рассмотрении тела многосвязной замкнутой области G , состоящего из однородных блоков $G^{[n]}$, для которых выполняется $G = \bigcup_n G^{[n]}$ [1–3]. Поверхность раздела блоков $G^{[n]}$ и $G^{[m]}$ — $S_{n,m} = G^{[n]} \cap G^{[m]}$, при этом для одного и того же элемента $S_{n,m}$: $S_{n,m}^+$ — граничные элементы, расположенные на стороне, обращенной к блоку $G^{[n]}$, а $S_{n,m}^-$ — на стороне, обращенной к смежному блоку $G^{[m]}$.

$\Gamma^{[n]}$ — свободная граница блока $G^{[n]}$ ($n, m = 1, \dots, N$). Описание напряженно-деформированного состояния области G осуществляется тензорами напряжений $\sigma = (\sigma_{ij})$ и деформаций $\varepsilon = (\varepsilon_{ij})$, где $i, j = x, y$, а также вектором перемещения $\bar{U}(u_x, u_y)$.

Для плоской деформации уравнения равновесия блоков имеют вид

$$\frac{\partial \sigma_{xx}^{[n]}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}^{[n]}}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial \sigma_{xy}^{[n]}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}^{[n]}}{\partial y} = 0. \quad (1)$$

Выражения для деформаций и напряжений:

$$\varepsilon_{xx}^{[n]} = \frac{\partial u_x^{[n]}}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy}^{[n]} = \frac{\partial u_y^{[n]}}{\partial y}, \quad \varepsilon_{xy}^{[n]} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x^{[n]}}{\partial y} + \frac{\partial u_y^{[n]}}{\partial x} \right); \quad (2)$$

$$\sigma_{xx}^{[n]} = \frac{2G^{[n]}}{1-2\nu^{[n]}} [(1-\nu^{[n]})\varepsilon_{xx}^{[n]} + \nu^{[n]}\varepsilon_{yy}^{[n]}],$$

$$\sigma_{yy}^{[n]} = \frac{2G^{[n]}}{1-2\nu^{[n]}} [(1-\nu^{[n]})\varepsilon_{yy}^{[n]} + \nu^{[n]}\varepsilon_{xx}^{[n]}], \quad (3)$$

$$\sigma_{xy}^{[n]} = 2G^{[n]}\varepsilon_{xy}^{[n]}, \quad \sigma_{zz}^{[n]} = \nu^{[n]}(\sigma_{xx}^{[n]} + \sigma_{yy}^{[n]}),$$

где $u_x^{[n]}, u_y^{[n]}$ — перемещения соответственно по осям x и y в прямоугольной системе координат; $G^{[n]}$ и $\nu^{[n]}$ — модуль сдвига и коэффициент Пуассона блока.

На внешней поверхности $\Gamma^{[n]}$ блоков $G^{[n]}$ и на поверхностях раздела $S_{n,m}$ граничные условия формулируются в предположении, что смежные блоки работают совместно. Если (\bar{e}_x, \bar{e}_y) — базис в декартовой системе координат, а $\bar{n} = (n_x, n_y)$ — нормаль в точке поверхности $S_{n,m}$, то векторы напряжений и перемещений на соответствующих участках поверхности раздела $S_{n,m}$ изменяются непрерывно и имеют вид

$$\bar{u}^{[n]} = \bar{u}^{[m]}, \quad \bar{t}^{[n]} = -\bar{t}^{[m]}, \quad (4)$$

где $\bar{u} = u_x \bar{e}_x + u_y \bar{e}_y$; $\bar{t} = (\sigma_{xx} n_x + \sigma_{xy} n_y) \bar{e}_x + (\sigma_{yy} n_y + \sigma_{xy} n_x) \bar{e}_y$.

Напряжения и смещения во внутренних точках блока находятся по формулам

$$\sigma_{ij}^{[n]}(X) = \int_{\partial S^{[n]}} H_{ijk}^{[n]}(X, Y) f_k^{[n]}(Y) dl, \quad (5)$$

$$u_i^{[n]}(X) = \int_{\partial S^{[n]}} I_{ik}^{[n]}(X, Y) f_k^{[n]}(Y) dl,$$

где $H_{ijk}^{[n]}(X, Y)$, $I_{ik}^{[n]}(X, Y)$ — функции влияния Грина ($i, j, k = x, y$), которые описывают напряжения и смещения во внутренних точках $X(x, y)$ n -го блока, вызванные действием единичной силы, приложенной в точке $Y(x, y)$ граничного или контактного контура $S^{[n]}$.

Расчетные формулы получаются с использованием условия (2) и фундаментальных решений уравнений (1) для кусочно-однородного тела. Предполагается, что граничные элементы $S_{n,m}^+$ и $S_{n,m}^-$ одного и того же элемента $S_{n,m}$ совпадают друг с другом ($n, m = 1, 2, \dots, N$).

По заданным граничным условиям (4) на внешней поверхности блока $S_{n,m}$ строятся системы уравнений, из которых находятся функции $f_k^{[n]}(Y)$, называемые фиктивными нагрузками:

$$\frac{1}{2} f_k^{[n]}(X) + \int_{\partial S^{[n]}} T^{[n]} dl_Y = t_k^{0[n]}(X), \quad (6)$$

где $T^{[n]} = H_{ijk}^{[n]}(X, Y) n_j(X) f_k^{[n]}(Y)$;

$$\int_{\partial S^{[n]}} I_{ik}^{[n]}(X, Y) f_k^{[n]}(Y) dl_Y = u_k^{0[n]}(X). \quad (7)$$

Для вычисления компонентов векторов перемещений и напряжений используем записанные в покомпонентном виде соотношения [4]

$$\frac{1}{2} f_k^{[n]}(X) + \int_{\partial S^{[n]}} T^{[n]} dl_Y - \frac{1}{2} f_k^{[m]}(X) - \int_{\partial S^{[n]}} T^{[m]} dl_Y = 0, \quad (8)$$

где

$$T^{[n]} = H_{ijk}^{[n]}(X, Y) n_j(X) f_k^{[n]}(Y), \quad T^{[m]} = H_{ijk}^{[m]}(X, Y) n_j(X) f_k^{[m]}(Y);$$

$$\int_{\partial S^{[n]}} I_{ik}^{[n]}(X, Y) f_k^{[n]}(Y) dl_Y = \int_{\partial S^{[m]}} I_{ik}^{[m]}(X, Y) f_k^{[m]}(Y) dl_Y. \quad (9)$$

При численной реализации задач для кусочно-однородных сред контуры внешней поверхности блоков $\Gamma^{[n]}$ и контуры поверхностей разделов $S_{n,m}$ аппроксимируются прямоугольными отрезками. Предполагается, что на примыкающих друг к другу отрезках смещения и усилия постоянны. В результате дискретизации для M граничных элементов получим систему $2M$ линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{j=1}^{2M} a_{ij} x_j = b_i, \quad i = 1, \dots, 2M, \quad (10)$$

где b_i — величины нагрузок или смещений (граничные условия); a_{ij} — элементы матрицы коэффициентов влияния, полученные из (6)–(9) после дискретизации контуров; x_j — значения функции f_k в точке контура для j -го граничного элемента.

Реализация задач для кусочно-однородных областей сводится к системе линейных алгебраических уравнений, не имеющей диагонального преобладания. Для получения устойчивого решения на основе метода регуляризации А.Н. Тихонова была сформулирована вариационная задача минимизации функционала, для которого решение является устойчивым:

$$f(x) = Ax - b^2 + \alpha x^2, \quad (11)$$

где A — матрица СЛАУ, полученная методом квадратур;

α — параметр регуляризации;

b — вектор граничных условий.

Минимум функционала (11) обеспечивается решением следующей системы:

$$(A^* A + \alpha E)x = A^* b + \alpha x_0, \quad (12)$$

где A^* — транспонированная матрица A ;

E — единичная матрица;

в качестве вектора x_0 используется вектор граничных условий.

Реализация варианта решения задачи поиска параметра α регуляризации в (12) состоит в многократном формировании и решении систем линейных уравнений. Алгоритм содержит внутренние и внешние циклы, обеспечивающие получение регуляризованного решения системы (10). Внешний цикл формирует сходящуюся к нулю последовательность $\{\alpha_q\}$, на элементах которой производится минимизация функционала (11). В качестве такой последовательности можно взять геометрическую прогрессию $\alpha_{q+1} = k\alpha_q$, $q = 0, 1, 2, \dots$, $k < 1$. После выбора очередного $\alpha = \alpha_q$ осуществляется переход на внутренний цикл.

Внутренний цикл обеспечивает поиск минимума функционала (11) при заданной величине $\alpha = \alpha_p$:

$$(A^* A + \alpha_p E)x = A^* b + \alpha_p x_0. \quad (13)$$

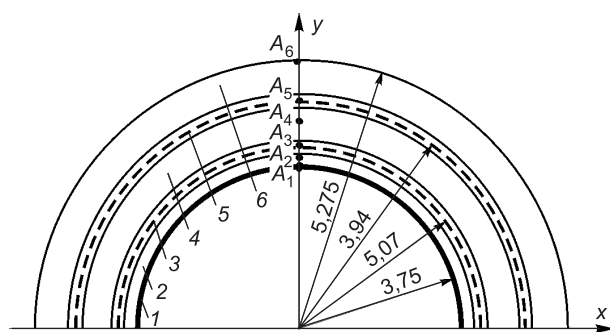
В качестве вектора x_0 при $\alpha = \alpha_0$ используется вектор граничных условий; на каждой последующей итерации — регуляризованное приближение x , полученное из предыдущей.

Критерием останова является критерий невязки, использующей регуляризованное приближение, получаемое на каждой итерации внутреннего цикла.

Тестирование построенных алгоритмов для расчета кусочно-однородных областей (комплекс программ ELB2D [3]) проводилось на известных решениях.

Описанная выше модель напряженного состояния сталежелезобетонных турбинных водоводов в условиях изотермической задачи применена для расчета турбинного водовода № 8 Саяно-Шушенской ГЭС.

Рассматривается сталежелезобетонный трубопровод круглого сечения, представляющий собой многослойное кольцо, состоящее из стальной оболочки и железобетонной обделки с двумя слоями кольцевой арматуры (рисунк): слой 1 — металлическая оболочка (сталь 09Г2С); слои 2, 4, 6 — бетон (марка М250); 3, 5 — арматурные кольца. Толщина арматурного кольца принята равной диаметру арматурных стержней (сталь класса А-II, диаметр арматурных стержней



Расчетная схема

внутренних и внешних колец от 40 до 70 мм)¹. Предполагалось, что металл оболочки, бетон и арматурные кольца — линейно деформируемые материалы. В табл. 1 приведены исходные данные для расчета напряженного состояния сталежелезобетонного турбинного водовода.

Расчеты выполнены для сечения 8–8 на участке примыкания к зданию ГЭС и 6–6 — в нижней части прямолинейного участка водовода. В табл. 2–4 приведены результаты расчета для сечения 8–8. Внутреннее давление в сечении 8–8 при УВБ = УМО = 500 м принималось 1,86 МПа и УВБ = НПУ = 540 м — 2,26 МПа². Предполагается, что при нулевом внутреннем давлении в металлической оболочке напряжения в бетоне и арматуре нулевые, т.е. отсутствуют. Бетон работает как линейно деформируемый изотропный материал.

Таблица 1

Данные для расчета напряженного состояния сталежелезобетонного турбинного водовода

Номер кольца	Конструктивный элемент	Внутренний радиус, см	Толщина, см	Модуль упругости E, МПа	Коэффициент Пуассона ν
1	Металлическая оболочка	375	2,5	$2,1 \cdot 10^5$	0,28
2	Бетон	377,5	9	$2,9 \cdot 10^4$	0,17
3	Арматура	386,5	7	$2,1 \cdot 10^5$	0,2
4	Бетон	393,5	113,5	$2,9 \cdot 10^4$	0,17
5	Арматура	507	6	$2,1 \cdot 10^5$	0,2
6	Бетон	513	12	$2,9 \cdot 10^4$	0,17

В табл. 2 приведены напряжения и радиальные перемещения конструктивных элементов сталежелезобетонного водовода, по данным Гордона — Готлифа [4], и результаты расчетов, выполненных методом граничных интегральных уравнений (МГИУ) для НПУ = 540 м.

¹ Пермякова Л.С., Рассказчиков В.А., Уляшинский В.А., Епифанов А.П., Кузнецова Ю.А. Напряженно-деформированное состояние элементов напорного тракта турбин Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. 2008. № 11. С. 11–18.

² УВБ — уровень воды в верхнем бьефе; УМО — уровень мертвого объема; НПУ — нормальный подпорный уровень.

Таблица 2

Радиальные, тангенциальные напряжения и радиальные перемещения конструктивных элементов сталежелезобетонного водовода № 8 в сечении 8–8 при НПУ = 540 м с учетом работы бетона как изотропного, линейно деформируемого материала

Номер кольца	Конструктивный элемент	Внутренний радиус, см	Методика Гордона–Готлифа*			МГИУ**		
			σ_{θ} , МПа	σ_r , МПа	u_r , мм	σ_{θ} , МПа	σ_r , МПа	u_r , мм
1	Металлическая оболочка	375	46,8	2,61	0,8	44,2	2,26	0,91
2	Бетон	377,5	6,41	2,28	0,8	6,34	2,02	0,91
3	Арматура	386,5	14,78	2,08	0,8	14,81	1,94	0,91
4	Бетон	393,5	6,09	1,79	0,8	6,01	1,64	0,91
5	Арматура	507	9,83	0,22	0,8	9,49	0,19	0,91
6	Бетон	513	4,47	0,08	0,8	4,41	0,10	0,91

Таблица 3

Радиальные, тангенциальные напряжения и радиальные перемещения конструктивных элементов сталежелезобетонного водовода № 8 в сечении 8–8 при НПУ = 540 м с учетом трещинообразования в бетоне

Номер кольца	Конструктивный элемент	Внутренний радиус, см	Методика Гордона–Готлифа*			МГИУ**		
			σ_{θ} , МПа	σ_r , МПа	u_r , мм	σ_{θ} , МПа	σ_r , МПа	u_r , мм
1	Металлическая оболочка	375	201,99	2,61	3,6	186,2	2,26	3,9
2	Бетон	377,5	0	1,35	3,6	0	1,32	3,9
3	Арматура	386,5	194,00***	1,28	3,6	142,2***	1,21	3,9
4	Бетон	393,5	0	0,55	3,6	0	0,49	3,9
5	Арматура	507	147,00***	0,32	3,6	102,51***	0,28	3,9
6	Бетон	513	0	0,00	3,6	0	0	3,9

* Расчетное давление воды в водоводе принято $P = 2,61$ МПа.

** Расчетное давление воды в водоводе принято $P = 2,26$ МПа.

*** Напряжения приведены непосредственно в арматуре.

Таблица 4

Радиальные, тангенциальные напряжения и радиальные перемещения конструктивных элементов сталежелезобетонного водовода № 8 при УМО = 500 м в сечении 8–8 с учетом работы бетона как изотропного, линейно деформируемого материала и с учетом трещинообразования

Номер кольца	Конструктивный элемент	Внутренний радиус, см	Сечение 8–8 (с учетом работы бетона как изотропного, линейно деформируемого материала)			Сечение 8–8 (с учетом трещинообразования в бетоне)		
			σ_{θ} , МПа	σ_r , МПа	u_r , мм	σ_{θ} , МПа	σ_r , МПа	u_r , мм
1	Металлическая оболочка	375	36,55	1,86	0,83	152,32	1,86	3,1
2	Бетон	377,5	5,32	1,68	0,83	0	1,09	3,1
3	Арматура	386,5	12,31	1,61	0,83	116,63*	1,00	3,1
4	Бетон	393,5	5,01	1,35	0,83	0	0,41	3,1
5	Арматура	507	7,85	0,16	0,83	84,76*	0,23	3,1
6	Бетон	513	3,65	0,08	0,83	0	0,00	3,1

Железобетонная обделка водовода Саяно-Шушенской ГЭС запроектирована как нетрещиностойкий композитный материал, представленный арматурой и бетоном. В режиме нормальной эксплуатации под воздействием гидростатического давления в металлической оболочке водовода после достижения бетоном предельных растягивающих напряже-

ний и при последующем нагружении в нем возникают радиальные трещины. Бетон постепенно выходит из работы на растяжение, воспринимаемое в дальнейшем только кольцевой арматурой и металлической оболочкой.

В качестве критерия трещинообразования в бетоне принято достижение напряжениями величины σ_p — предела прочности бетона на растяжение [4]. Предполагается, что до возникновения трещин бетон работает как линейно деформируемый изотропный материал с модулем упругости E_6 . При достижении тангенциальными напряжениями предела прочности на растяжение ($\sigma_\theta \geq \sigma_p$) в бетоне образуется система радиальных трещин. Модуль упругости бетона в тангенциальном направлении становится равным нулю. В радиальном направлении остается E_6 .

Результаты расчетов, выполненных с учетом трещинообразования в бетоне, приведены в табл. 3. В табл. 4 отражены результаты расчетов МГИУ радиальных и тангенциальных напряжений и радиальных смещений в конструктивных элементах сталежелезобетонного водовода № 8 в сечении 8–8 при УМО = 500 м без учета и с учетом трещинообразования в бетоне.

Расчеты выполнены для точек A_1, A_2, \dots, A_6 , указанных на рисунке.

Результаты расчетов с использованием МГИУ сопоставимы с результатами Гордона—Готлифа [4] как по величинам (с учетом различия в исходных данных давления воды в водоводе 2,61 МПа [4] и 2,26 МПа расхождения результатов расчетов не превосходят 5–7 %), так и по характеру распределения напряжений по толщине многослойного кольца. В металлической оболочке — максимальные радиальные напряжения, снижающиеся с удалением к внешнему бетонному слою; максимальные тангенциальные напряжения — в металлической оболочке и арматурных кольцах. В результатах расчетов, выполненных с учетом трещинообразования в бетоне, тангенциальные напряжения непосредственно в арматуре и металлической оболочке выше, чем в расчетах без учета трещинообразования: в металлической оболочке в 4,3 раза [4] и 4,2 (МГИУ); во внутреннем арматурном кольце в 13,1 раза [4] и 11,7 (МГИУ); во внешнем арматурном кольце в 14,9 [4] и 13,5 (МГИУ).

Вышеизложенное позволяет говорить о возможности использования МГИУ для кусочно-однородных массивов в качестве расчетного аппарата напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов сталежелезобетонного водовода.

Инструментальные и визуальные наблюдения за состоянием водоводов Саяно-Шушенской ГЭС свидетельствуют о наличии трещинообразования в бетонных кольцах водоводов³. Поэтому дальнейшие расчеты необходимо выполнять с учетом трещинообразования в бетоне.

Выводы. Результаты расчетов, выполненных методом граничных интегральных уравнений, сравнение их с методикой расчета Л.А. Гордона и А.А. Готлифа свидетельствуют о возможности использования МГИУ для кусочно-однородных массивов в качестве расчетного аппарата напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов сталежелезобетонного водовода.

Расчеты НДС для водовода № 8 необходимо выполнять с учетом трещинообразования в бетоне.

³ Пермякова Л.С., Рассказчиков В.А., Уляшинский В.А., Епифанов А.П., Кузнецова Ю.А. Указ. соч.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Muralha. A probabilistic model for the normal compliance of rock joints [Текст] / Muralha // 9th Congress ISRM. — Paris ; Rotterdam : Balkema, 2001.
2. Gakhova, L.N. Solving problems of stressed states of a mass having block structure. Geocology and computers [Текст] / L.N. Gakhova. — М. ; Rotterdam : Balkema, 2001.
3. Гахова, Л.Н. Программа расчета напряженно-деформированного состояния массива блочной структуры методом граничных интегральных уравнений (ELB2D) [Текст] / Л.Н. Гахова. РосАПО. Свид. об офиц. регистр. № 960814 от 17.12.2004.
4. Гордон, Л.А. К расчету сталежелезобетонных трубопроводов с учетом трещинообразования в бетоне [Текст] / Л.А. Гордон, А.А. Готлиф // Изв. ВНИИГ. — 1978. — Т. 120. — С. 47–52.

ГАХОВА Л.Н., канд. физ.-мат. наук, гл. науч. сотр.

ИГД СО РАН

КУЗНЕЦОВА Ю.А., ст. препод.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 22.06.10

Gakhova L.N., candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher, Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Russia

Kuznetsova Yu.A., senior lecturer, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

BOUNDARY INTEGRAL APPROACH TO STRESS CALCULATION IN STEEL AND CONCRETE POWER CONDUITS

The paper discusses stress-strain state problem formulation and the boundary integral approach to stress calculation in terms of steel and concrete power conduits of the Sayano-Shushenskaya Hydroelectric Power Station. The calculation sets aside effects of temperature. Testing of the results obtained for piecewise-homogeneous domains includes the known solutions.

Key words: steel and concrete power conduits, stress-strain state, flaw formation.

REFERENCES

1. Muralha. A probabilistic model for the normal compliance of rock joints [Text] / Muralha // 9th Congress ISRM. — Paris ; Rotterdam : Balkema, 2001.
2. Gakhova, L.N. Solving problems of stressed states of a mass having block structure. Geocology and computers [Text] / L.N. Gakhova. — М. ; Rotterdam : Balkema, 2001. — P. 241–244.
3. Gakhova, L.N. Stress-strain state analysis program for a block-structure rock mass based on the boundary integral approach (ELB2D). RosAPO. Registration Certificate N 960814 dated December 17, 2004.
4. Gordon, L.A. Calculation of steel and concrete power conduits with taking into account flaw formation in concrete [Text] / L.A. Gordon, A.A. Gotlif // VNIIG Transactions. — 1978. — Vol. 120. — P. 47–52.

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.92:631.243.5

М.В. БОДРОВ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ВИХРЕВЫХ ВОЗДУХООХЛАДИТЕЛЕЙ В ОВОЩЕХРАНИЛИЩАХ

Разработана методика определения расчетной мощности холодильных установок для охлаждения насыпей сочного растительного сырья в осенний и весенний периоды года в различных климатических районах страны. Дано технологическое и экономическое обоснование применения в хранилищах холодильных установок на основе вихревых воздухоохладителей. Экспериментально определены теплотехнические характеристики вихревой трубы. Обоснованы с технико-экономической точки зрения допустимые области применения холодильных установок и воздухонагревателей на базе вихревых труб.

Ключевые слова: вихревая труба, овощекртофелехранилище, расчетная температура поступающего в насыпь воздуха, холодопроизводительность.

Рассмотрим потребность в естественном и искусственном холоде в осенний и весенний периоды года в хранилищах картофеля и овощей, оборудованных системами активной вентиляции, в различных климатических районах страны.

В осенний период реальная обеспеченность естественным холодом для поддержания температурного режима насыпей различных видов сочного растительного сырья (СРС), рассчитанная с учетом критериев климатического районирования страны [1], приведена в таблице. Анализ значений температур поступающего в насыпь воздуха $t_{в.о}$ показал, что для Ростова-на-Дону (расчетная температура наружного воздуха в холодный период года $t_{н} \approx -20$ °С) независимо от даты начала охлаждения любого сырья требуется искусственное охлаждение приточного воздуха. Разность температур $\Delta t_{в.о}$ между минимальной температурой наружного воздуха в ночные и предутренние часы, когда $t_{н} = t_{в.о}$, и требуемой по биологическим и теплофизическим требованиям $t_{в.о}^p$ всегда больше нуля. Аналогичная картина наблюдается в климатических условиях Нижнего

Расчетная температура поступающего в насыпь воздуха, °С

Климатический район	Дата	Картофель			Корнеплоды			Капуста		
		$t_{в.о}$	$t_{в.о}^p$	$\Delta t_{в.о}$	$t_{в.о}$	$t_{в.о}^p$	$\Delta t_{в.о}$	$t_{в.о}$	$t_{в.о}^p$	$\Delta t_{в.о}$
Ростов-на-Дону	10.10	8,74	2	6,74	8,74	1	7,74	8,74	0	8,74
	15.10	7,78	2	5,78	7,78	1	6,78	7,78	0	7,78
Нижний Новгород	10.10	4,17	2	2,17	4,17	1	3,17	4,17	0	4,17
	15.10	2,83	2	0,83	2,83	1	1,83	2,83	0	2,83
Томск	10.10	1,20	2	-0,8	1,20	1	0,20	1,20	0	1,20
	15.10	0,35	2	-1,65	0,35	1	-0,65	0,35	0	0,35

© Бодров М.В., 2010

Новгорода ($t_n \approx -30$ °С). При $t_n \approx -40$ °С (Томск) параметры наружного воздуха практически удовлетворяют агробиологическим и теплотехническим требованиям и его искусственного охлаждения не требуется.

Графически соотношения величин температур наружного воздуха t_n , хранящейся продукции t_k и текущей разности этих температур $\Delta t_{в.о}$ в период охлаждения СРС при $t_n \approx -30$ или -40 °С показаны на рис. 1, а (заштрихованная область). В осенний период года, когда температура наружного воздуха $t_n \approx -20$ °С и выше, подаваемый в насыпь наружный воздух всегда требует искусственного охлаждения (рис. 1, б).

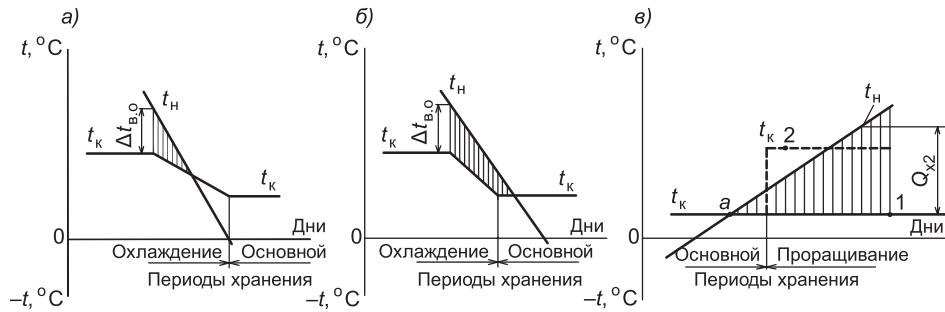


Рис. 1. Соотношения температур воздуха $t_n = t_{в.о}$ и продукции t_k в период охлаждения

Расход холода на обработку воздуха Q_{x1} при расходе воздуха L_n , м³/ч, составляет

$$Q_{x1} = L_n c_v \rho_v \Delta t_{в.о} \text{ [Вт]}, \quad (1)$$

где c_v — удельная теплоемкость воздуха, Вт · ч/(кг · °С);

ρ_v — плотность воздуха при $t_{в.о}$, кг/м³.

Необходимость расхода искусственного холода для охлаждения насыпи СРС в весенний период года определяется положением точки пересечения значений текущей температуры наружного воздуха t_n и температуры продукции t_k (точка a на рис. 1, в). При коэффициенте обеспеченности параметров наружного воздуха $K_{об} = 0,92$ в районах с $t_n \approx -40$ °С такой момент наступает 22–24 апреля, с $t_n \approx -30$ °С — 9–11 апреля, с $t_n \approx -20$ °С — 20–22 марта. Значения t_n , определяемые точкой a , для ночных и предутренних часов наблюдаются соответственно 4–7 мая, 1–3 и 18–21 апреля.

Максимальный расход холода, необходимый для удаления биологических тепловыделений из насыпи (заштрихованная область на рис. 1, в), равен:

$$Q_{x2} = L_n c_v \rho_v (t_n - t_{в.о}^p). \quad (2)$$

Семенной картофель перед посадкой проращивают при температуре не ниже 10...12 °С. На рис. 1, в изменение температуры клубней при проращивании t_k показано штриховыми линиями. Возможны моменты, когда $t_n < t_k$. Если в хранилище находится семенной картофель, то колебания t_n влияют только на продолжительность периода проращивания.

Системы охлаждения воздуха хранилищ в течение года работают относительно небольшой период. При работе систем активной вентиляции только в наиболее прохладные ночные и предутренние часы охлажденный воздух в насыпь СРС необходимо подавать не более 180 ч в год.

Основные требования, предъявляемые к воздухоохлаждательным установкам хранилищ: термодинамическое совершенство; широкий диапазон

регулирования холодопроизводительности; простота в обслуживании, длительный ресурс использования; отсутствие ядовитых веществ; постоянная готовность к пуску; возможность одновременной или попеременной выработки холода и теплоты одной установкой. Практически всем вышеперечисленным требованиям отвечают холодильные установки, основанные на принципе работы вихревых энергоделителей, — вихревые трубы (ВТ). Их единственным недостатком является низкий КПД. Однако в условиях работы вихревых воздухоохладителей в хранилищах термодинамическое несовершенство вихревых труб уходит на второй план. Начинают превалировать такие факторы, как низкие капитальные и амортизационные затраты и эксплуатационная надежность установок.

Схематически конструкция противоточной ВТ приведена на рис. 2. Вихревая труба представляет собой цилиндрическую или коническую трубу 1, снабженную тангенциальным соплом 2, улиткой 3. Труба имеет диафрагму с осевым отверстием 4 и дроссель 5. При поступлении сжатого воздуха через сопло образуется интенсивный круговой поток, приосевые слои которого заметно охлаждаются и отводятся через отверстие диафрагмы в виде холодного потока, а периферийные слои подогреваются и вытекают через дроссель в виде горячего потока.

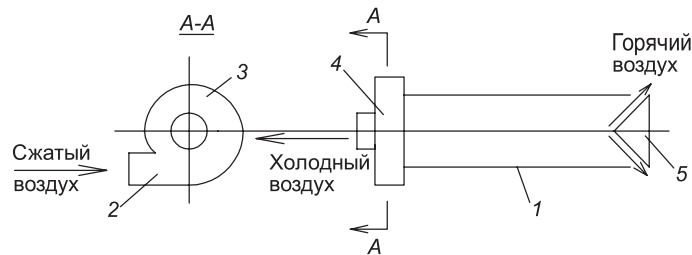


Рис. 2. Схема противоточной вихревой трубы

Величины, являющиеся основными для построения характеристик ВТ: полные температуры и давления поступающего в сопло сжатого воздуха T_1^* и p_1^* , холодного потока T_x^* и p_x^* , горячего потока T_r^* и p_r^* [2]. Эффекты охлаждения холодного и подогрева горячего потоков выражаются зависимостями $\Delta t_x = T_1^* - T_x^*$, $\Delta t_r = T_r^* - T_1^*$. При расходе сжатого воздуха G , холодного G_x и горячего G_r потоков относительный расход холодного потока составляет $\mu = G_x / G$, а относительный расход горячего потока — $G_r / G = 1 - \mu$.

Удельные холодопроизводительность q_x и теплопроизводительность q_r ВТ, отнесенные к 1 кг поступающего в ВТ воздуха, равны:

$$q_x = \mu \Delta t_x c_p, \quad q_r = (1 - \mu) \Delta t_r c_p. \quad (3)$$

Общая производительность по холоду Q_x и теплоте Q_r составляет:

$$Q_x = \mu \Delta t_x c_p G, \quad Q_r = (1 - \mu) \Delta t_r c_p G. \quad (4)$$

В процессе проведенных нами экспериментальных исследований вихревого воздухоохладителя выявлялись его реальные тепловые и гидравлические характеристики и зависимости Δt_x , Δt_r , Q_x , $Q_r = f(\mu)$ при различных степенях расширения воздуха π . Они являются исходными для разработки холодильных установок хранилищ для картофеля и овощей на базе вихревых труб. Проектирование, изготовление ВТ и опытной установки и экспериментальные исследования проводились под руководством д.т.н., профессора Л.М. Дыскина.

Вихревая труба диаметром 10 мм испытывалась при избыточных (абсолютных) давлениях сжатого воздуха $p_b = 0,4$ МПа (0,5 МПа), 0,3 МПа (0,4 МПа), 0,2 МПа (0,3 МПа) в диапазоне значений μ от 0,05 до 0,95. Результаты испытаний ВТ при $p_b = 0,4$ МПа (0,5 МПа) приведены на рис. 3.

Полученные характеристики позволяют определять холодо- и теплопроизводительность ВТ применительно к осеннему и весеннему периодам хранения при охлаждении приточного воздуха, а также к периоду хранения в течение зимы, когда возникает необходимость в подаче в помещение теплого воздуха.

При использовании ВТ рациональна установка их в блок для получения расчетной холодопроизводительности. Схема обвязки из десяти вихревых труб в блоке приведена на рис. 4. Вихревые трубы 1 снабжаются сжатым воздухом из магистрального трубопровода 3, соединенного с компрессором. Холодный поток воздуха поступает в магистраль холодного воздуха 4, а нагретый — в магистраль горячего воздуха 5. Значения коэффициента μ регулируются дросселями 2. Для контроля температур сжатого, холодного и горячего воздуха предназначены термометры 7, а для контроля давления — манометр 8. После блока ВТ воздух поступает в приточный воздуховод 9, имеющий индивидуальную систему контроля параметров воздуха. Режимы работы отдельных ВТ и блока труб по периодам года регулируются комплексом арматуры 6. В осенний и весенний периоды года поток горячего воздуха удаляется в атмосферу, а холодный — направляется в приточный воздуховод системы вентиляции. В хо-

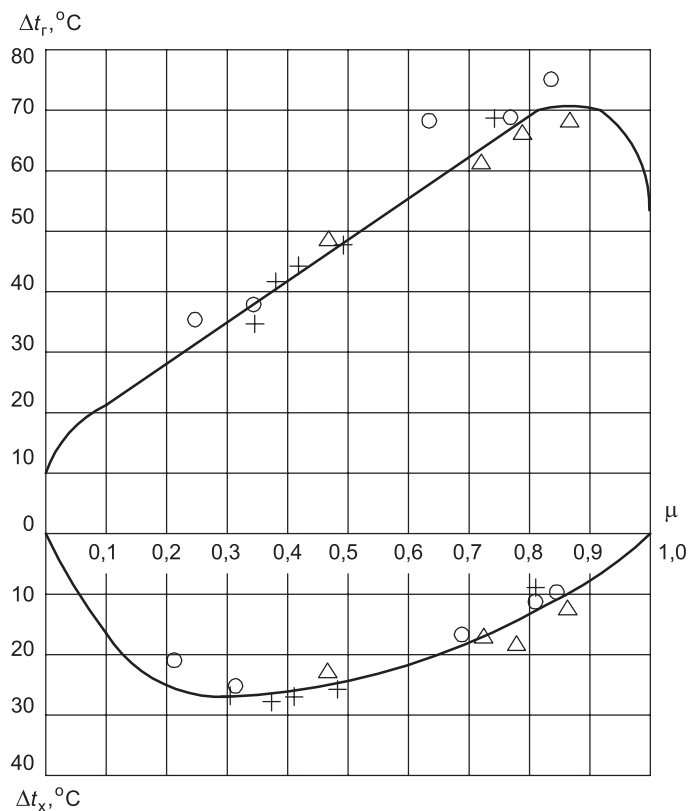


Рис. 3. Экспериментальные зависимости $\Delta t_x = f(\mu)$ и $\Delta t_r = f(\mu)$ при $p_b = 4,0$ МПа (5,0 МПа): O серия опытов 1; + серия опытов 2; Δ серия опытов 3

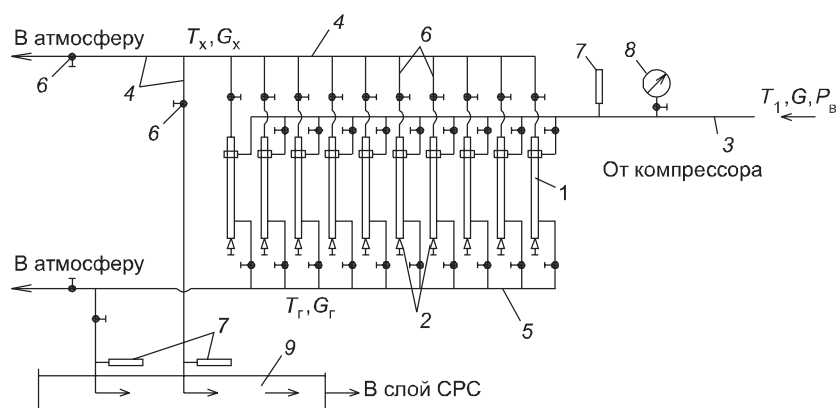


Рис. 4. Схема обвязки блока вихревых труб

лодный период поток нагретого воздуха поступает в приточный воздуховод, а поток холодного воздуха удаляется в атмосферу.

При эксплуатации ВТ, установленных в блок, следует учитывать, что все они должны иметь одинаковые характеристики. Необходимость постоянства коэффициента $\mu = G_x / G$ обусловлена особенностями наложения аэродинамических характеристик параллельно установленных гидравлических машин. Применение в одном блоке вихревых труб с различными характеристиками влечет за собой уменьшение их общей производительности. Такой процесс свойствен всем параллельно установленным гидравлическим машинам, работающим на общую сеть [3].

Проведены количественные сопоставления по приведенным затратам и выявлены допустимые области применения аналогичных рассматриваемым вихревым трубам по холодопроизводительности парокompрессионных генераторов холода и турбодетандеров [4]. Экономически допустимая область применения холодильных установок на базе вихревых труб в хранилищах биологически активного сырья ограничена большими энергетическими затратами на производство сжатого воздуха. По сравнению с турбодетандерными и парокompрессионными фреоновыми холодильными установками агрегаты из блока вихревых труб экономически оправданно применять при их производительности 160...220 и 230...270 м³/ч сжатого воздуха соответственно.

Применение блока ВТ в качестве стационарных систем воздушного отопления хранилищ не может быть рекомендовано для массового использования из-за высокой стоимости сжатого воздуха. Возможно применение ВТ в холодный период года в качестве аварийного отопления при нерасчетном понижении температуры наружного воздуха.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жада н, В.З. Критерии климатического районирования страны в целях использования естественного холода в картофеле- и овощехранилищах [Текст] / В.З. Жада н, Н.Н. Рослов, Л.В. Мартынова, С.И. Кулаков // Холодильная техника. — 1986. — № 6. — С. 10–13.
2. ГОСТ 22617–77. Вихревые трубы. Термины и определения. — М., 1977.
3. Бромлей, М.Ф. Гидравлические машины и холодильные установки [Текст] / М.Ф. Бромлей. — М. : Стройиздат, 1971. — 260 с.
4. Дыскин, Л.М. Вихревые термостаты и воздухоохладители [Текст] / Л.М. Дыскин. — Н. Новгород : ННГУ, 1991. — 85 с.

*БОДРОВ М.В., канд. техн. наук, ст. препод.
Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 09.06.10

Bodrov M.V., candidate of technical sciences, senior lecturer, Hizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

THE EFFECTIVENESS OF THE APPLICATION OF VORTEX AIR COOLERS IN THE VEGETABLE STORAGEES

The technique of definition of settlement capacity of a refrigerating machinery is developed for cooling of embankments of juicy vegetative raw materials during the autumn and spring periods of year in various climatic regions of the country. The technological and economic substantiation of application in storehouses of a refrigerating machinery on the basis of vortical air coolers is given. Thermal characteristics of a vortical pipe are experimentally defined. Admissible scopes of a refrigerating machinery and installations for heating of air on the basis of vortical pipes are proved from the technical and economic point of view.

Key words: vortical pipe, premise for storage of a potato and vegetables, settlement temperature of air arriving in an embankment, developed capacity of a cold.

REFERENCES

1. Z h a d a n, V.Z. Criteria of climatic division into districts of the country with a view of use of a natural cold in a potato- and vegetable storehouses [Text] / V.Z. Zhadan, N.N. Roslov, L.V. Martynova, S.I. Kulakov // Refrigerating technics. — 1986. — N 6. — P. 10–13.
2. State standard (GOST) 22617–77. Vortical pipes. Terms and definitions [Text]. — M., 1977.
3. B r o m l e y, M.F. Hydraulic cars and refrigerating machinery [Text] / M.F. Bromley. — M. : Stroyizdat, 1971. — 260 p.
4. D y s k i n, L.M. Vortical thermostats and air coolers [Text] / L.M. Dyskin. — N. Novgorod : NNGU, 1991. — 85 p.

УДК 628.336

Т.И. ХАЛТУРИНА, О.В. ЧУРБАКОВА, Т.А. КУРИЛИНА

ОБРАБОТКА И УТИЛИЗАЦИЯ ОСАДКА КИСЛОТНО-ЩЕЛОЧНЫХ СТОЧНЫХ ВОД МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Представлены результаты исследований состава и структуры осадка кислотно-щелочных сточных вод с помощью рентгенофазового и термографического анализа. Приведены данные по изменению свойств осадка после криогенной обработки и рекомендации по его использованию в технологии строительных материалов.

Ключевые слова: осадок, кислотно-щелочные стоки, рентгенофазовый и термографический анализ, криогенная обработка, утилизация, добавки, строительные материалы.

Одна из главных задач улучшения состояния природной среды — внедрение малоотходных технологических процессов на промышленных предприятиях. При очистке сточных вод металлообрабатывающих предприятий наиболее сложной проблемой считается обработка осадков, относящихся к труднофильтруемым суспензиям коллоидного типа.

Целью работы являлась разработка эффективного способа обработки осадков кислотно-щелочных сточных вод, обеспечивающего улучшение водоотдающих свойств для утилизации. Объектом исследований служили реальные осадки, полученные при нейтрализации промывных кислотных-щелочных стоков ОАО Красноярского металлургического завода, которые образуются в результате технологических процессов при механической обработке алюминиевых изделий (галтовкой, гидромеханическим полированием, травлением, осветлением). Результаты определения pH стоков, поступающих в резервуар-усреднитель, указали на их преимущественно щелочной характер (pH = 9,7...12,0). Данные химического анализа сточной воды представлены в табл. 1.

Таблица 1

Химический анализ кислотно-щелочных сточных вод

Химический элемент	Si ⁴⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	Cr ⁶⁺	Cu ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻
Концентрация, мг/дм ³	12,0	6,1	181,6	0,019	0,45	5,0	5,0	233,3

При нейтрализации щелочных стоков раствором H₂SO₄ до pH = 7,5...7,8 образуются осадки, структура и свойства которых были изучены с использованием рентгеноструктурного и термографического анализов. Дифрактограмма осадка, полученная на аппарате Дрон-3, представлена на рис. 1. Условия снятия: V = 35 кВ; I = 20 мА; шкала 1000 мм/с, скорость вращения диаграммной ленты 720 мм/ч.

Термографический анализ осадка был выполнен на дериватографе Q-1500Д. Дериватограмма осадка (рис. 2) представлена в виде кривых: температурной T, дифференциальной ДТА, термовесовой ТГ, дифференциально-термографической ДТГ. Эндотермический эффект при t = 190 °С объясняется потерей адсорбированной воды.

© Халтурина Т.И., Чурбакова О.В., Курилина Т.А., 2010

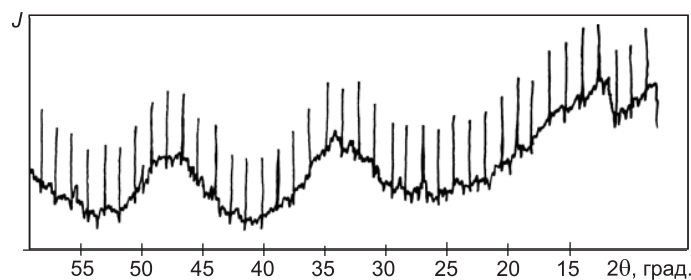


Рис. 1. Диффрактограмма осадка

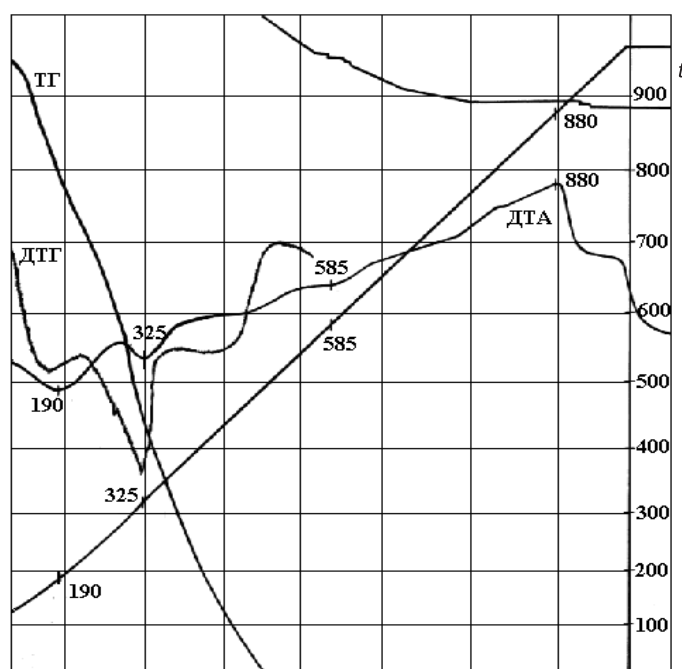
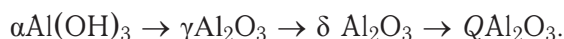


Рис. 2. Дериватограмма осадка

Дифференциально-термический анализ указал на наличие гиббсита при $t = 585$ и 600 °С:



Из диффрактограммы (см. рис. 1) видно, что степень упорядоченности осадка очень низкая, вещество в основном представлено в аморфном виде. Данные исследований по изучению свойств осадка приведены в табл. 2, из которой видно, что осадок обладает высокой влажностью и большим значением удельного сопротивления фильтрации.

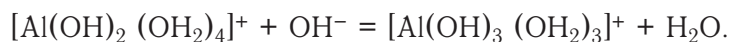
Из данных химического анализа сточных вод (см. табл. 1) следует, что при нейтрализации образуется $\text{Al}(\text{OH})_3$, который может давать поли-

Таблица 2

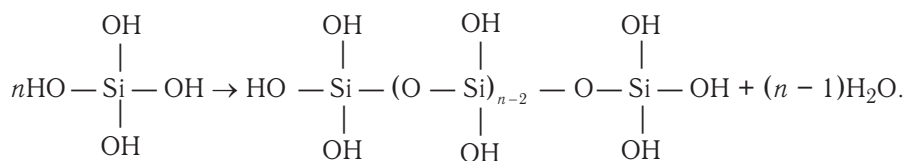
Свойства осадка

Плотность ρ , г/см ³	Влажность W , %	Сухой остаток, г/дм ³	Прокаленный остаток, г/дм ³	Потери при прокаливании, г/дм ³	Удельное сопротивление осадка фильтрации, см/г
0,89	98,2	18,21	10,28	7,93	$273,3 \cdot 10^{10}$

мерные соединения. При действии щелочи ионы OH^- в аквакомплексах $[\text{Al}(\text{OH}_2)_6]^{3+}$ постепенно замещают молекулы воды:



Одновременно происходит полимеризация с образованием многоярусных компонентов. Кроме того, возможно образование ортокремниевой кислоты H_4SiO_4 , способной к полимеризации:



В зависимости от технологии обработки алюминиевых изделий состав осадка меняется, в некоторых случаях образуются большие объемы трудноосаждающихся осадков.

Для улучшения водоотдающих свойств осадка применяется криогенная обработка [1–3]. Были проведены исследования влияния криогенеза осадка на изменение его свойств. Замораживание осадка проводилось в естественных условиях при разных температуре воздуха и скорости ветра.

Методика проведения эксперимента: в емкости помещался равный объем ($V = 400 \text{ дм}^3$) натурального осадка кислотнo-щелочных сточных вод для замораживания, при этом высота слоя осадка $H = 1,8 \text{ дм}$, площадь зеркала осадка составляла $S = 372 \text{ см}^2$, удельная поверхность была равна $93 \text{ мм}^2/\text{мг}$. Фиксировалась глубина промерзания с помощью иглофильтра с интервалом 1 ч.

По результатам исследований построены графические зависимости кинетики замораживания (рис. 3) и седиментации (рис. 4) осадка. Данные исследований по изучению свойств осадка при разной температуре замораживания приведены в табл. 3.

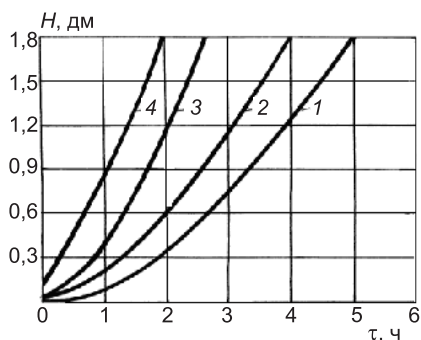


Рис. 3. Кинетика замораживания осадка кислотнo-щелочных сточных вод $S_{\text{уд}} = 93 \text{ мм}^2/\text{мл}$
 1 — $t = -8 \text{ }^\circ\text{C}$, $V = 1,8 \text{ м/с}$; 2 — $t = -10 \text{ }^\circ\text{C}$,
 $V = 0,8 \text{ м/с}$; 3 — $t = -14 \text{ }^\circ\text{C}$, $V = 2,2 \text{ м/с}$;
 4 — $t = -17 \text{ }^\circ\text{C}$, $V = 3,2 \text{ м/с}$

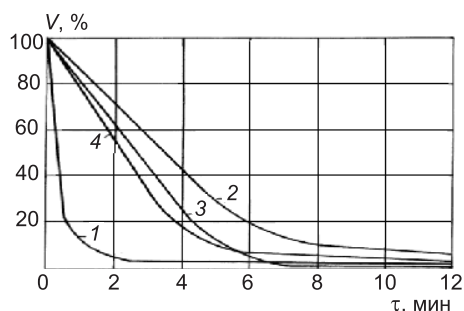


Рис. 4. Кинетика седиментации осадка кислотнo-щелочных сточных вод
 1 — $t = -17 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 — $t = -14 \text{ }^\circ\text{C}$; 3 — $t = -10 \text{ }^\circ\text{C}$;
 4 — $t = -8 \text{ }^\circ\text{C}$

Результаты исследований

Свойства осадка	Исходный осадок	Осадок после замораживания и оттаивания			
		$t = -8\text{ }^{\circ}\text{C}$ $V = 1,8\text{ м/с}$	$t = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ $V = 0,8\text{ м/с}$	$t = -14\text{ }^{\circ}\text{C}$ $V = 2,2\text{ м/с}$	$t = -17\text{ }^{\circ}\text{C}$ $V = 3,2\text{ м/с}$
Плотность, г/см ³	0,89	0,94	0,93	0,99	0,94
Сухой остаток, г/л	18,21	27,35	28,2	34,2	39,88
Прокаленный остаток, г/л	10,28	22,10	23,40	30,60	34,35
Остаток после прокаливания, г/л	7,93	5,25	4,80	3,92	5,53
Удельное сопротивление осадка, см/г	$273 \cdot 10^{10}$	$78 \cdot 10^{10}$	$63 \cdot 10^{10}$	$71 \cdot 10^{10}$	$153 \cdot 10^{10}$

Дифрактограмма осадка после замораживания и оттаивания показана на рис. 5. Как видно, при замораживании и оттаивании изменяется структура и свойства осадка, в результате чего улучшается его водоотдающая способность (объем осадка уменьшается \sim в 10 раз), удельное сопротивление осадка фильтрации — в 5 раз.

Установлено, что для медленно замороженного осадка (см. рис. 3, кривую 1) характерна лучшая водоотдача, что объясняется влиянием интенсивности замораживания на изменение физико-химической структуры осадка.

Для регулирования процесса криогенной обработки в естественных условиях на кафедре «Водоснабжение и водоотведение» ИГУиРЭ ФГОУ ВПО СФУ разработана установка (рис. 6), в которой рабочая камера оборудована шитом, в нем вмонтирована плоскость-элерон, которую можно установить на определенный угол движения воздушного потока, что позволяет изменять скорость движения воздуха над охлаждающейся поверхностью осадка, интенсифицировать теплообмен и кинетику процесса промораживания.

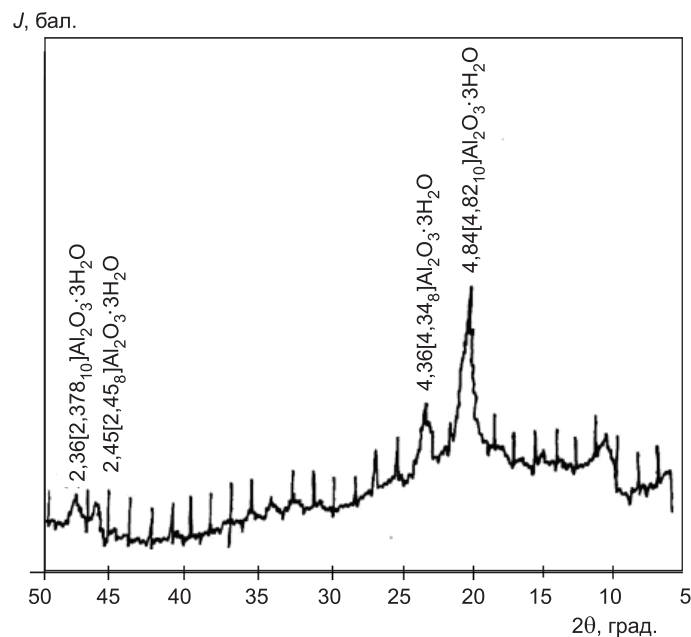


Рис. 5. Дифрактограмма осадка

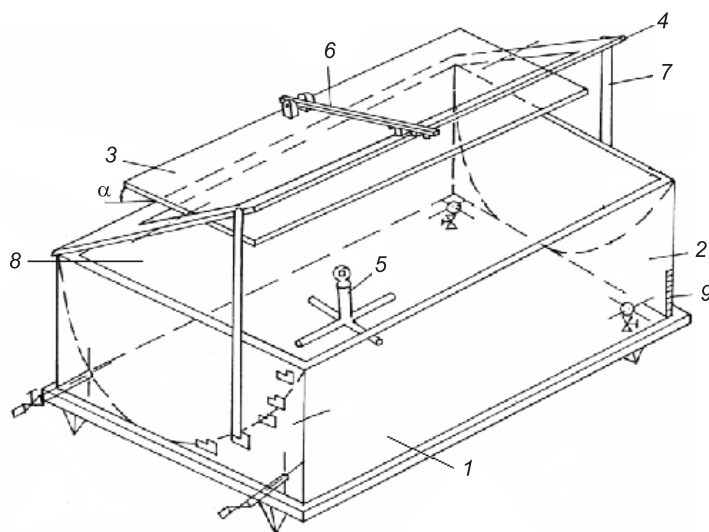


Рис. 6. Установка для замораживания осадка

1 — передвижная емкость с рабочей камерой; 2 — гидростеки; 3 — плоскость-элерон; 4 — щит; 5 — монтажная траверса; 6, 7 — системы подъема рабочего щита и плоскости-элерона; 8 — рабочая камера; 9 — термоматчик

Были проведены экспериментальные исследования по изучению влияния угла наклона элерона на водоотдачу осадка. Данные изменения скорости ветра в зависимости от α приведены в табл. 4.

Результаты исследований влияния угла поворота плоскости α на водоотдающие свойства осадка при $t = -10^\circ\text{C}$ (W — влажность, %; V — остаточный объем, %) приведены в табл. 5.

Таблица 4

Данные изменения скорости ветра в зависимости от α

α , град.	t , $^\circ\text{C}$	$V_{\text{атм}}$, м/с	$V_{\text{элер}}$, м/с	ΔV
15	-15	1,98	2	0,02
30	-9	1,9	2,25	0,35
45	-8	1,15	1,76	0,64
60	-6	1,58	2,88	1,3
75	-4	2	2,24	0,24
80	-4	2,6	2,64	0,04

Таблица 5

Влияние угла поворота плоскости α на водоотдающие свойства осадка

Параметр	Исходный осадок	α , град.			
		0	30	45	60
W , %	99	88	87,9	87,5	78
$V_{\text{ост}}$, %	100	22	1,8	17,2	16,3
ΔV , м/с	—	0	0,35	0,64	1,3

Таким образом, оборудование установки плоскостью элерон позволяет интенсифицировать скоростное поле, что влияет на поверхностную плотность теплового потока, которая определяет полноту промораживания осадка, обуславливающую обезвоживание.

Для разработки технологии утилизации обезвоженного осадка кислотнo-щелочных сточных вод проведены экспериментальные исследования по использованию их в качестве добавок к строительным материалам. Были приготовлены составы из гипса, воды и осадка. Установлено, что добавление в объеме от 2 до 2,5 % обезвоженного осадка приводит к значительному снижению средней плотности (объемной массы) гипсово-

го камня. При этом увеличивается пористость изделий, а следовательно, улучшаются их теплоизоляционные свойства. Введение добавок осадка в состав бетонных и растворных смесей также улучшает их свойства и снижает удельный расход цемента.

Ниже приводятся рекомендуемые составы:

а) для гипсовых изделий: гипс 650 кг/м³, вода 250 л/м³, осадок 15 кг/м³;

б) для обычного бетона: портландцемент 250...300 кг/м³, песок 600...700 кг/м³, щебень 1250...1350 кг/м³, вода 185...190 л/м³, осадок 2,5...3 кг/м³;

в) для арболита: портландцемент 300...500 кг/м³, древесная дробленка 150...200 кг/м³, вода 250 л/м³, осадок 3...3,5 кг/м³.

Выводы. 1. Проведен анализ качества осадков кислотнo-щелочных сточных вод, позволивший определить их свойства для разработки технологии обработки и утилизации.

2. Установлено, что замораживание и последующее оттаивание приводит к изменению структуры осадков и улучшению его водоотдающих свойств.

3. Показано, что осадок можно использовать в качестве добавки для строительных материалов: в арболитовых смесях; в качестве алюмосодержащей добавки, ускоряющей твердение цементного камня; в гипсовом камне улучшается пористость и, следовательно, снижается масса изделий, что обеспечивает хорошую тепло- и звукоизоляцию; для бетонов и строительных растворов в качестве пластифицирующей добавки; для производства керамических изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Любарский, В.М. Осадки природных вод и методы их обработки [Текст] / В.М. Любарский. — М. : Стройиздат, 1980. — 129 с.
2. Туровский, И.С. Обработка осадка сточных вод [Текст] / И.С. Туровский. — М. : Стройиздат, 1988. — 146 с.
3. Халтурина, Т.И. Исследование процесса криогенной обработки маслосодержащего осадка [Текст] / Т.И. Халтурина, О.В. Чурбакова, Ю.В. Гаврилова // Сб. матер. всерос. научно-практ. конф., Красноярск, 13.12.2007 г. — Красноярск, 2007. — С. 479–480.
4. Чурбакова, О.В. Обработка и утилизация осадков сточных вод металлообрабатывающих предприятий [Текст] / О.В. Чурбакова : Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Новосибирск, 2001.

ХАЛТУРИНА Т.И., канд. хим. наук, проф.

Институт градостроительства, управления и региональной экономики ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» г. Красноярск

ЧУРБАКОВА О.В., канд. техн. наук, доц.

Политехнический институт ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

КУРИЛИНА Т.А., инж.

Институт градостроительства, управления и региональной экономики ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» г. Красноярск

Получено после доработки 23.04.10

Khalturina T.I., candidate of chemical sciences, professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Churbakova O.V., candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Kurilina T.A., engineer, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

PROCESSING AND RECYCLING SLUDGE ACID-ALKALINE WASTEWATER METALWORKING ENTERPRISES

The results of studies of the composition and structure of the precipitate of the acid-alkali wastewater using X-ray diffraction and thermal analysis. The data on sediment properties after cryogenic treatment and recommendations for its use of technology in building materials.

Key words: precipitate, the acid-alkaline wastewater, X-ray and thermal analysis, cryogenic treatment, recycling, additives, construction materials.

REFERENCES

1. Lubarsky, V.M. Precipitation in natural waters and methods of treatment [Text] / V.M. Lubarsky // M. : Stroyizdat, 1980. — 129 p.
 2. Turovsky, I.S. Treatment of sewage sludge [Text] / I.S. Turovsky. — M. : Stroyizdat, 1988. — 146 p.
 3. Khalturina, T.I. Investigation of cryogenic treatment of oil-filled sludge [Text] / T.I. Khalturina O.V. Churbakova, Yu.V. Gavrilova // Proc. All-Russian scientific-practical conf. — Krasnoyarsk, 13. 12. 2007. — Krasnoyarsk, 2007. — P. 479–480.
 4. Churbakova, O.V. Treatment and disposal of sewage sludge metalloobrabaty oping enterprise [Text] / O.V. Churbakova : Abstract of thesis for account. Cand. in technical sciences. — Novosibirsk, 2001.
-

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.542.001

Д.Э. АБРАМЕНКОВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ, Г.В. ГЛАДЫШЕВ, П.В. ЧУБАРОВ

КАМЕРЫ ПРИСОЕДИНЕННЫХ ОБЪЕМОВ С ЖЕСТКИМИ И ЭЛАСТИЧНЫМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ В ДРОССЕЛЬНЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УДАРНЫХ МЕХАНИЗМАХ

Рассматриваются пневмоударные механизмы с камерами, имеющими перфорированные межкамерные перегородки, отделяющие неуправляемые и управляемые камеры присоединенного объема от камер рабочего и холостого хода.

Ключевые слова: пневмоударный механизм, ударник, камеры рабочего и холостого хода, камера присоединенного объема.

Пневматические ударные механизмы [1–4] подразделяются на механизмы, имеющие камеры с жесткими и эластичными межкамерными перфорированными перегородками и их комбинации. Кроме того, камеры ударного механизма могут быть непроточными (неуправляемыми и управляемыми) и проточными (неуправляемыми и управляемыми).

Конструктивные решения камер присоединенных объемов и камер рабочего хода с жесткими и эластичными перегородками представлены на рис. 1, с межкамерными жесткими перегородками — на рис. 2.

Диаграмма изменения давления воздуха в камере рабочего хода и камере присоединенного объема, неуправляемой, непроточной, с жесткой перфорированной перегородкой приведена на рис. 3^{1,2}. Энергетические характеристики пневмоударного механизма — молотка МЗП-10: без присоединенного объема камеры рабочего хода энергия удара 9,0 Дж, частота ударов 35,3 Гц; с присоединенным объемом соответственно — 9,3 Дж и 36,5 Гц при абсолютном давлении воздуха, подводимого к молотку, $p_0 = 0,6$ МПа. Здесь T , t_p , t_x — соответственно полное время цикла, время рабочего и холостого хода.

На рис. 4 представлены расчетные диаграммы изменения давления воздуха в камерах рабочего и холостого хода с присоединенными объемами для физико-математической модели МЗП-10. Здесь p_p^* , p_x^* — давление воздуха в камере присоединенного объема со стороны камер рабочего и холостого хода — сплошные линии; p_p , p_x — давление воздуха в камерах рабочего и холостого хода — штриховые; p_0 — давление воздуха, подве-

¹ Абраменков Э.А. Пневматические механизмы машин ударного действия: дроссельные, струйные, беззолотниковые, бесклапанные: Справ. пособ. / Э.А. Абраменков, Д.Э. Абраменков. Новосибирск: Изд-во НГУ. 1993. 430 с.

² Изыскание и исследование воздухораспределительных устройств пневматических машин ударного действия для работы в условиях Крайнего Севера / НТО Новосиб. орден Трудового Красного Знамени инженерно-строительного института им. В.В. Куйбышева (НИСИ). Шифр № 83-11, № гос. регистр. 01830019714. Новосибирск: НИСИ, 1983. 99 с.

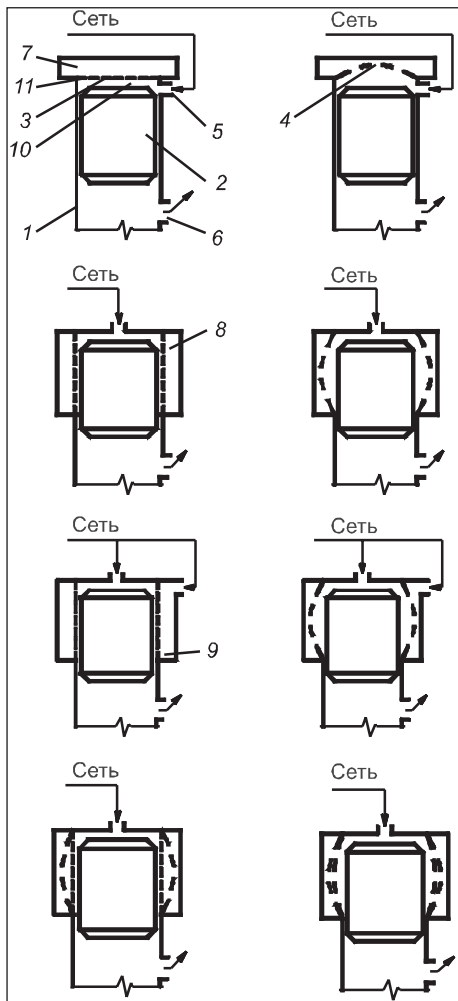


Рис. 1. Конструктивные решения камер присоединенных объемов и камер рабочего хода с жесткими и эластичными перегородками

1 — корпус; 2 — ударник; 3, 4 — жесткая и эластичная перегородки; 5 — канал впуска воздуха из сети; 6 — канал выпуска отработавшего воздуха; 7 — камера присоединенного объема, неуправляемая, непроточная; 8 — камера присоединенного объема, управляемая, непроточная; 9 — камера присоединенного объема, управляемая, проточная; 10 — камера рабочего хода; 11 — перфорация

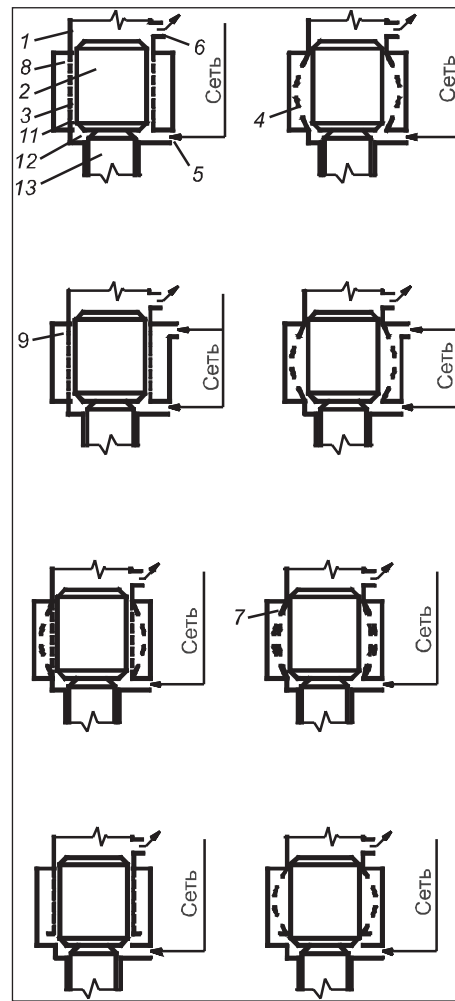


Рис. 2. Конструктивные решения камер присоединенных объемов и камер холостого хода с межкамерными жесткими перегородками

Обозначения аналогичны принятым в рис. 1. Кроме того, 12 — камера холостого хода; 13 — хвостовик рабочего инструмента

денное к молотку (модели). Энергия удара и частота ударов для физико-математической модели составили 10 Дж и 42 Гц.

Как показала предварительная качественная и количественная оценка рабочего цикла для камеры рабочего хода, снижение давления воздуха в камерах за время t_x и повышение давления за время t_p приводят, как и предполагалось, к снижению усилия отдачи и амплитуды вибрации корпуса, а также повышению энергии и частоты ударов. Рабочий процесс со стороны камеры рабочего хода протекает без повышения шума при выпуске отработавшего воздуха, что можно объяснить некоторой задержкой воздуха в камере присоединенного объема и его перепуском в атмосферу, а также тем, что давление воздуха к началу выпуска не превышает характерной величины для обычного дроссельного пневматического ударного механизма.

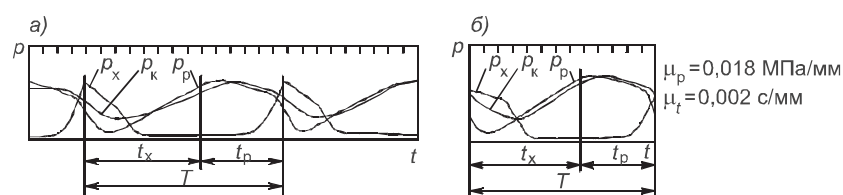


Рис. 3. Изменения давления воздуха в камере рабочего хода p_p , камере присоединенного объема p_k , камере холостого хода p_x дроссельного пневматического ударного механизма при $p_0 = 0,6$ МПа

а — осциллограмма, записанная с помощью измерительной аппаратуры; б — диаграмма, рассчитанная на ЭВМ

Эластичные межкамерные перегородки обеспечивают изменение объемов камер присоединенного объема, чем поддерживается более высокое давление воздуха при уменьшении объема камеры рабочего и холостого хода и более низкое — при его увеличении. Отмеченное усиливает положительный эффект снижения силы нажатия, вибрации и шума выпускаемого отработавшего воздуха, которые свойственны механизмам с жесткими перегородками.

Количественную оценку можно выполнить, решив систему уравнений, учитывающую изменение давления воздуха в камерах, и уравнение движения ударника. При этом физико-математическое моделирование позволит получить безразмерные значения параметров для геометрических соотношений перфорированных отверстий в жестких и эластичных межкамерных перегородках камер с присоединенными объемами, выбрать рациональные объемы указанных камер.

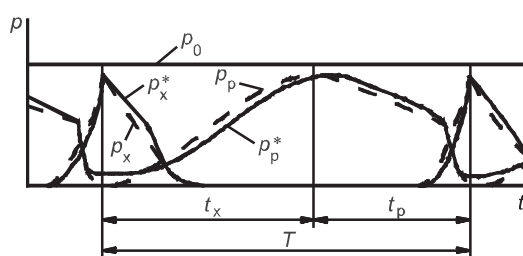


Рис. 4. Расчетные диаграммы изменения давления воздуха в камерах рабочего и холостого хода с присоединенными объемами при $p_0 = 0,6$ МПа

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А. с. 682643 СССР. Пневматический молоток / Э.А. Абраменков, Ю.И. Лебедев, Г.Е. Садов, Д.Г. Суворов. — Оpubл. 1979, БИ № 32.
2. А. с. 118862 СССР. Пневматический молоток / Э.А. Абраменков, А.Г. Богаченков, Н.А. Клушин. — Оpubл. 1985, БИ № 36.
3. А. с. 1129343 СССР. Пневматический молоток с дроссельным воздухораспределением / Э.А. Абраменков, Г.Ф. Тимофеев. — Оpubл. 1984, БИ № 46.
4. А. с. 1469120 СССР. Пневматический молоток с дроссельным воздухораспределением / Э.А. Абраменков, Г.Ф. Тимофеев. — Оpubл. 1989, БИ № 12.

АБРАМЕНКОВ Д.Э., д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

АБРАМЕНКОВ Э.А., д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ГЛАДЫШЕВ Г.В., асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ЧУБАРОВ П.В., асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 25.05.10

Abramenkov D.E., doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Abramenkov E.A., doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Gladyshev G.V., post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Chubarov P.V., post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

CHAMBERS OF ATTACHED VOLUMES WITH RIGID AND ELASTIC PARTITIONS IN THROTTLE PNEUMATIC SHOCK MECHANISMS

In this article mechanisms with perforated interchamber partitions separating uncontrollable and controlled chambers of attached volumes from chambers of operating and idle strokes are considered.

Key words: pneumatic shock mechanism, drummer, chambers of operating and idle strokes, chambers of attached volume.

REFERENCES

1. A. s. 682643 USSR. A pneumatic hammer / E.A. Abramenkov, Yu.I. Lebedev, G.E. Sadv, D.G. Suvorov. — Publ. 1979, Bul. N 32.
2. A. s. 118862 USSR. A pneumatic hammer / E.A. Abramenkov, A.G. Bogachenkov, N.A. Klushin. — Publ. 1985, Bul. N 36.
3. A. s. 1129343 USSR. A pneumatic hammer with throttle air distribution / E.A. Abramenkov, G.F. Timofeev. — Publ. 1984, Bul. N 46.
4. A. s. 1469120 USSR. A pneumatic hammer with throttle air distribution / E.A. Abramenkov, G.F. Timofeev. — Publ. 1989, Bul. N 12.

УДК 621.926/.927

И.А. СЕМИКОПЕНКО, В.П. ВОРОНОВ, П.П. ПЕНЗЕВ

ДЕЗИНТЕГРАТОР С ЭФФЕКТИВНОЙ КАМЕРОЙ ПОМОЛА

Описана конструкция дезинтегратора, позволяющая эффективно использовать рабочее пространство камеры помола и обеспечивающая дополнительные нагрузки на измельчаемый материал. Представлено математическое описание определения угла вылета частиц с наружного ряда плоских мелющих элементов с учетом радиальной скорости схода воздуха с мелющих элементов.

Ключевые слова: дезинтегратор, частица, мелющий элемент, бронеплита.

Среди многочисленного оборудования ударно-центробежного действия для помола и активации мягких малоабразивных материалов наибольший интерес представляют дезинтеграторы [1]. В дезинтеграторах обработка материала осуществляется свободным нестесненным соударением частиц измельчаемого материала и мелющим элементом. Основные особенности и эффекты обработки определяются скоростью и характером этих соударений. Одним из недостатков работы дезинтеграторов при центральной загрузке является незначительное количество соударений частиц материала с мелющими элементами, которое принято считать равным количеству рядов мелющих элементов в камере помола [1].

В статье описывается конструкция (рис. 1), позволяющая наиболее эффективно использовать рабочее пространство камеры помола и обеспечить дополнительные нагрузки на измельчаемый материал.

Дезинтегратор работает следующим образом. Исходный материал из загрузочной точки с помощью шнекового питателя 4 поступает в центральную часть камеры помола, образованную двумя роторами 1, вращающимися от электродвигателей 3 в противоположных направлениях. Далее за счет центробежных сил материал направляется в зону действия концентрически расположенных мелющих элементов 2. Мелющие элементы наружного ряда роторов имеют в 1,5–2 раза большую радиальную длину мелющих элементов внутренних рядов для исключения проскока частиц без соударения и обеспечения вентиляционного эффекта в периферийной части камеры помола.

Пройдя последовательно все ряды мелющих элементов, частицы материала попадают в периферийную часть помольной камеры, содержащую дугообразные каналы 5 (рис. 1) возврата материала в рабочее пространство и бронеплиты 7 дополнительного измельчения материала (рис. 2). Для повышения эффективности помола в дугообразных каналах 5 жестко закреплены бронеплиты 6. За счет центробежной силы частицы крупной фракции направляются в дугообразные каналы 5, имеющие сужение от входа к выходу в направлении движения материала с внешнего ряда мелющих элементов. Геометрические параметры дугообразных каналов определяются скоростью воздушного потока на выходе с последнего ряда мелющих элементов 2. Наиболее крупные частицы соударяются с бронеплитами 6 и измельчаются. На выходе из каналов 5 возврата материала в зону действия мелющих элементов 2 частицы материала направ-

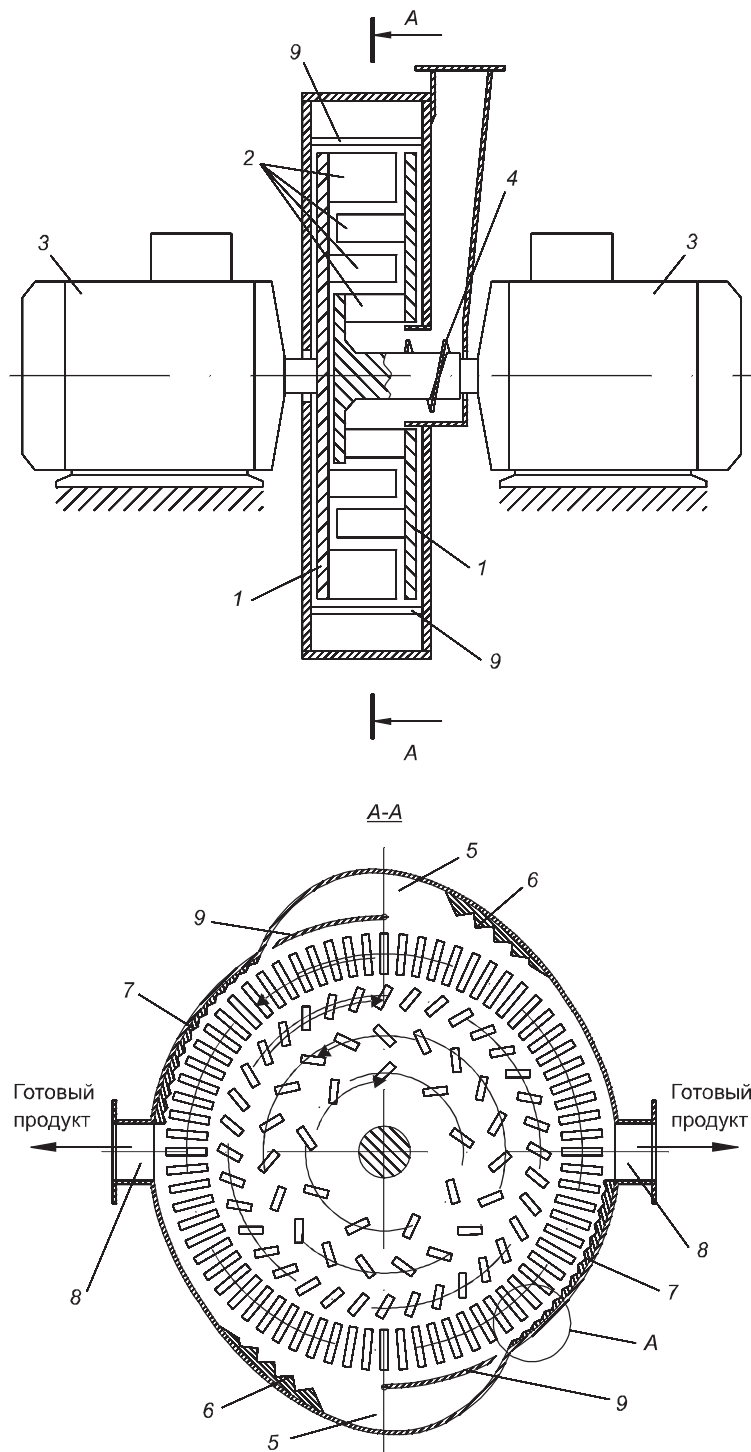


Рис. 1. Дезинтегратор с эффективной камерой помола

1 — ротор; 2 — мелющий элемент; 3 — электродвигатель; 4 — шнековый питатель; 5 — дугообразный канал; 6, 7 — бронеплиты; 8 — разгрузочный патрубок; 9 — перегородка

ляются на бронеплиты 7 переменного сечения. На данном участке частицы материала получают многократные циклические нагрузки вследствие высокочастотного изменения рабочего зазора между диаметром описанной окружности внешнего ряда мелющих элементов и наружной поверх-

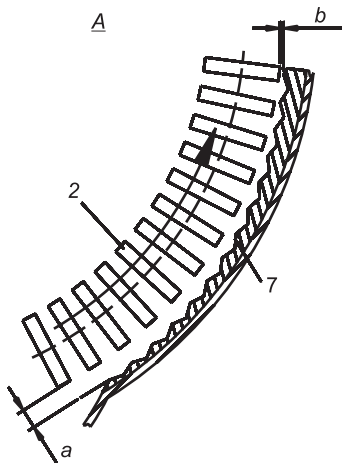


Рис. 2. Поперечное сечение участка дополнительного измельчения материала

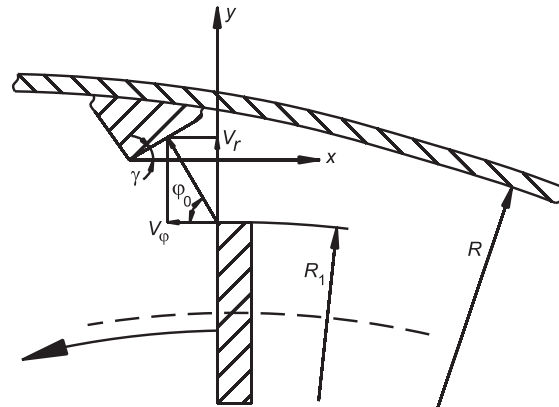


Рис. 3. Расчетная схема к определению угла установки бронеплиты 6

ностью бронеплит. Вследствие повышенного износа бронеплит 7 требуется их быстрая замена. Частицы готового продукта отводятся через разгрузочные патрубки 8, ось которых проходит через центр роторов.

Крупная фракция материала продолжает свое движение в камере помола до тех пор, пока крупность не достигнет заданной величины. Для исключения забивания дугообразного канала возврата материала перегородка 9 осуществляет незначительные технологические колебания с малой амплитудой за счет ее подвижного закрепления. Благодаря рециклу крупной фракции частиц в дезинтеграторе имеется возможность дополнительного измельчения материала и увеличения концентрации частиц материала в помольном пространстве, что приводит к их самоизмельчению.

Применение дугообразных каналов возврата материала способствует увеличению доли обратного отскока частиц материала с периферийного ряда мелющих элементов на внутренние ряды, увеличению количества соударений частиц с мелющими элементами, что существенно повышает эффективность помола.

Если определить угол вылета частиц с наружного ряда плоских мелющих элементов, можно путем применения бронеплит 6 и 7 с рациональным углом установки рабочих поверхностей организовать эффективный режим работы камеры помола дезинтегратора.

С этой целью рассмотрим плоскую модель движения двухфазной среды (воздух, частица материала) в дезинтеграторе. Если предположить при этом, что радиальная и окружная скорости движения среды и частицы материала определяются только расстоянием от оси вращения, и ввести полярную систему координат (r, φ) с центром на оси вращения, то система дифференциальных уравнений, описывающих поле скоростей двухфазной среды, будет иметь вид

$$\begin{cases} V_r \frac{dV_r}{dr} = \frac{V_\varphi^2}{r} + \frac{1}{\tau} (U_r - V_r), \\ V_r \frac{dV_\varphi}{dr} = \frac{V_r V_\varphi}{r} + \frac{1}{\tau} (U_\varphi - V_\varphi), \end{cases} \quad (1)$$

где U_r , V_r и U_φ , V_φ — радиальные и окружные компоненты соответственно скорости среды (воздуха) и частицы материала;

$$\tau = \frac{\rho d^2}{18\mu_0}, \quad (2)$$

здесь ρ — плотность частицы материала;
 d — диаметр (поперечный размер) частицы материала;
 μ_0 — коэффициент динамической вязкости двухфазной среды, равный $1,84 \cdot 10^{-6}$ Па · с.

В силу того, что расстояние от последнего ряда мелющих элементов до корпуса дезинтегратора ($R - R_1$) является небольшой величиной (порядка 2...3 мм), можно считать, что для расстояний $R_1 \leq r < R$ поля скоростей воздушного потока и частиц материала — постоянные величины.

В первом уравнении системы (1) для радиально расположенных мелющих элементов последнего ряда радиальная скорость схода воздуха с мелющих элементов, по данным работы [3], определяется по формуле

$$U_r = \omega R_1 \sqrt{\frac{h}{R_1} \left(2 - \frac{h}{R_1} \right)}, \quad (3)$$

где ω — частота вращения ротора;
 h — рабочая высота мелющих элементов.
 Если ввести безразмерную величину

$$\xi = \frac{h}{R_1} \quad (4)$$

и учесть, что это величина первого порядка малости, то соотношение (3) с точностью до величин второго порядка малости можно привести к виду

$$U_r \cong \sqrt{2} \omega R_1 \sqrt{\xi} \left(1 - \frac{\xi}{4} \right). \quad (5)$$

Согласно результату работы [4], радиальная скорость схода частицы материала с радиально расположенного мелющего элемента равна:

$$V_r = \frac{\omega R_1}{2\mu}, \quad (6)$$

где μ — коэффициент трения частицы материала о поверхность мелющего элемента.

Если обозначить через α отношение радиальной скорости частицы материала к радиальной скорости схода воздуха с мелющего элемента, то

$$\alpha = \frac{V_r}{U_r} \cong \frac{\sqrt{2} \left(1 + \frac{\xi}{4} \right)}{4\mu \sqrt{\xi}}. \quad (7)$$

Из первого уравнения системы (1) с учетом (7) находим

$$V_\varphi = \sqrt{\frac{R_1}{\tau}} U_r (\alpha - 1). \quad (8)$$

Из второго уравнения системы (1) находим, что

$$U_\varphi = V_\varphi \left(1 + \frac{\tau}{R_1} V_r \right). \quad (9)$$

Таким образом, полученные соотношения (5), (6), (8) и (9) определяют значения скоростей воздуха и частицы материала в пространстве между последним рядом мельющих элементов и корпусом дезинтегратора.

Согласно расчетной схеме, представленной на рис. 3, значение угла γ определяется соотношением

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \varphi_0 = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\alpha \sqrt{U_r}}{\sqrt{\frac{R_1}{\tau}(\alpha - 1)}} \quad (10)$$

График зависимости $\gamma(d)$ при различных значениях ξ приведен на рис. 4.

Таким образом, задавая конструктивные (R_1 , h) и технологические (ω , μ) параметры камеры помола, можно организовать рациональные углы атаки частиц материала рабочей поверхностью бронеплит b и 7 , тем самым обеспечивая эффективный режим работы камеры помола дезинтегратора.

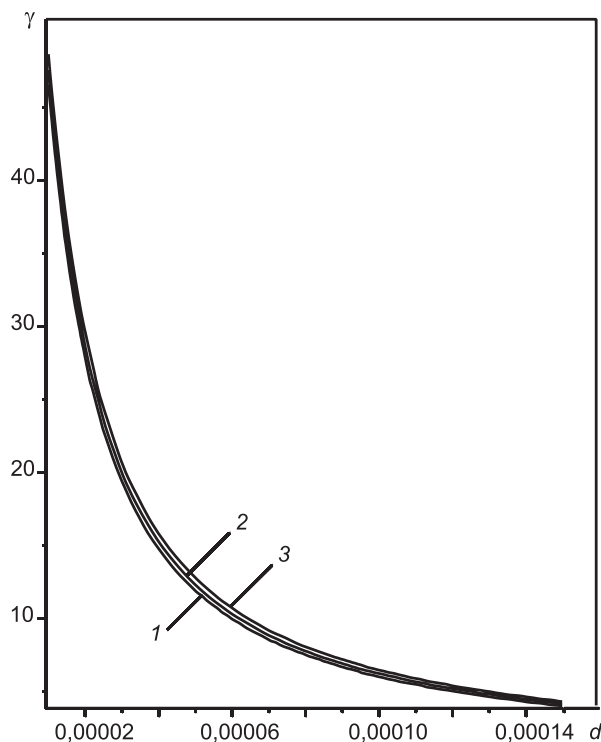


Рис. 4. График зависимости $\gamma(d)$ при различных значениях ξ
 1 — $\xi = 0,65$; 2 — $\xi = 0,55$; 3 — $\xi = 0,45$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хинт, И.А. Основы производства силикальцитных изделий [Текст] / И.А. Хинт. — М. ; Л. : Стройиздат, 1962. — 636 с.
2. Ильинский, В.М. Измерение массовых расходов [Текст] / В.М. Ильинский. — М. : Энергия, 1973. — 142 с.
3. Клочков, Н.В. Методика расчета расхода воздуха в центробежно-ударной мельнице [Текст] / Н.В. Клочков, В.Н. Блиничев, С.П. Бобков, А.В. Пискунов // Изв. вузов. Химия и химическая технология. — 1982. — № 2. — С. 230–232.
4. Воронов, В.П. Теоретические исследования скорости движения частиц материала вдоль поверхности ударного элемента мельницы дезинтеграторного типа [Текст] / В.П. Воронов, И.А. Семикопенко, П.П. Пензев // Изв. вузов. Строительство. — 2008. — № 11–12. — С. 93–96.

СЕМИКОПЕНКО И.А., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ВОРОНОВ В.П., канд. физ.-мат. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ПЕНЗЕВ П.П., асп.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено 04.05.10

Semikopenko I.A., candidate of technical sciences, assistant professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Voronov V.P., candidate of physical and mathematical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Penzev P.P., post-graduate student, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

DISINTEGRATOR WITH EFFICIENT CAMERA OF THE GRINDING

We described the construction of the disintegrator, allowing effectively use the workspace of the grind camera and providing additional loads on grinding material. We also presented the mathematical formulation of expressions for determination of the particles flight corner from the external row of plain milling elements taking into account the radial velocity of the air out from milling elements.

Key words: disintegrator, particle, grinding element, armorplate.

REFERENCES

1. Hint, I.A. Manufacture bases of silicacition products [Text] / I.A. Hint. — M. ; L. : Stroyizdat, 1962. — 636 p.
2. Ilinsky, V.M. Measurement of mass expenses [Text] / V.M. Ilinsky. — M. : Energy, 1973. — 142 p.
3. Klochkov, N.V. The methods of the calculation of the consupcion of the air in centrifugal-striking mill [Text] / N.V. Klochkov, V.N. Blinichev, S.P. Bobkov, A.V. Piskunov // News of Higher Educational Institutions. Chemistry and chemical technology. — 1982. — N 2. — P. 230–232.
4. Voronov, V.P. Theoretical of research of speed of movement of particles of a material along a surface of a shock element of a mill dezintegrator type [Text] / V.P. Voronov, I.A. Semikopenko, P.P. Penzev // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2008. — N 11–12. — P. 93–96.

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

УДК 504.054(-21)

И.М. СЕНЮЩЕНКОВА, Т.Г. СМИРНОВА

ГЕОХИМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ НА СЛОЖНОМ РЕЛЬЕФЕ

Рассмотрены вопросы загрязнения снежного покрова городских овражных территорий. Определены основные показатели качества снежного покрова в начале накопления и в конце снеготаяния. Установлены линейные закономерности содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и в снежном покрове.

Ключевые слова: городские овраги, снежный покров, загрязнение окружающей среды.

При оценке степени загрязненности окружающей среды наибольший интерес представляют природные индикаторы. Одним из современных методов индикаторных процессов воздушной миграции природных и техногенных веществ является геохимическое исследование снежного покрова.

Возможность использовать снежный покров для исследования загрязнения природной среды давно привлекала внимание ученых. Еще в 1925 году И.В. Курчатов впервые выполнил работу по исследованию радиоактивности снежного покрова.

Снежный покров обладает рядом свойств, делающих его удобным индикатором загрязнения не только самих атмосферных осадков, но и атмосферного воздуха, а также последующего загрязнения вод и почв¹. Отбор проб снега достаточно прост и не требует сложного оборудования по сравнению с отбором проб воздуха. Послойный отбор проб снежного покрова позволяет получить динамику загрязнения за зимний сезон, а всего лишь одна проба по всей толще снежного покрова дает представление о загрязнении в период от образования устойчивого снежного покрова до момента отбора пробы. Он позволяет решить проблему количественного определения суммарных параметров загрязнения (сухих и влажных выпадений).

Хорошо известно, что задача измерения параметров загрязнения влажных выпадений решается достаточно удовлетворительно, но до сих пор нет способов надежного определения загрязнения сухих выпадений. Разнообразные технические способы дают, как правило, несопоставимые результаты. Снежный покров как естественный планшет-накопитель дает действительную величину сухих и влажных выпадений в холодный период и, наконец, выступает как эффективный индикатор процессов закисления природных сред [1].

¹ Раткин Н.Е. Закономерности аэротехногенного загрязнения снежного покрова (на примере Печенегского района): дис. ... канд. геогр. наук. Апатиты, 1996. 178 с.

Усиленное развитие тема загрязнения снежного покрова получила в середине XX века. В 1973 году И.М. Назаровым, Ш.Д. Фридманом и О.С. Ренне было предложено существующую сеть Гидрометеослужбы использовать как один из возможных и экономически весьма эффективных путей развития наблюдательной сети за загрязнением окружающей среды. Это послужило основой для перехода к качественно новому виду работ — мониторингу загрязнения снежного покрова на базе снегомерной сети, используемой для определения физических параметров снежного покрова: высоты, плотности и влагозапаса. Однако было установлено, что снежный покров может быть использован и для решения более сложных задач: определения вещественного состава и мощности выбросов предприятий, доли вещества, увлекаемого в дальнейший и локальный перенос [1, 2], для изучения динамики содержания в снежном покрове растворенных солей техногенных веществ и выявления их миграции из снега в почву [3].

Как источник воды, снежный покров определяет режим влаги в верхнем слое почв, водотока и гидрологической сети в целом. Практическая значимость сведений о запасах и динамике накопления снега в ландшафтах в плане контроля загрязнения территории огромна.

Выдающийся ученый А.И. Воейков показал большое значение снежного покрова в природе. Он впервые поднял вопрос о проведении систематических снегомерных наблюдений. Учение А.И. Воейкова о снежном покрове получило развитие благодаря деятельности В.В. Докучаева. Считая влагу решающим фактором, обеспечивающим урожайность, плодородность южных степей России, В.В. Докучаев придавал большое значение точному учету распределения снежного покрова на различных элементах ландшафта.

Сезонный снежный покров не является активным слоем ни в химическом, ни в биологическом отношении, как, например, почва, так как в нем почти не происходит химическая трансформация вещества, поэтому снег и служит индикатором предшествовавшего загрязнения атмосферы и будущего загрязнения почвы и гидросферы.

Накопившиеся вещества техногенного происхождения при таянии снега частично проецируются на подстилающую поверхность, а частично выносятся потоками талых вод. Таким образом, химические вещества поступают в почву, водоемы, определенная их часть поглощается растительностью, что может привести, в зависимости от продолжительности воздействия, к необратимым изменениям в природных биогеоценозах. Накопление химических веществ за весь период залегания сезонного снежного покрова делает возможным определение даже минимального их содержания.

Загрязнение снежного покрова происходит в два этапа. На первом этапе загрязняются снежинки во время пребывания в облаке и выпадения на местность (влажное осаждение). На втором этапе происходит загрязнение выпавшего снега во время сухого осаждения загрязняющих веществ из атмосферы.

Химический состав снега определяется следующими параметрами:

- 1) содержанием различных химических примесей, имеющих в выпадающих атмосферных осадках;
- 2) поглощением снежным покровом различных газов из воздуха и наоборот;
- 3) количеством оседающих из воздуха различных растворимых веществ;

4) взаимодействием снежного покрова с воздухом почвогрунтов и в целом с почвенно-растительным покровом;

5) ветровой деятельностью, определяющей пополнение снежного покрова органическими и минеральными частицами почвогрунтов и растительных осадков;

6) избирательным влиянием микроорганизмов и животных, ведущих зимой активный образ жизни.

После отложения снежинок их форма претерпевает значительные изменения. Дендритовые кристаллы распадаются на отдельные части, более крупные частицы растут за счет более мелких. Ведущую роль в процессах перекристаллизации играет миграция молекул воды в виде водяного пара. Подавляющая часть снега, проходя через газообразную форму, отлагается в виде новых кристаллов глубинной заморозки. Поскольку большая часть снежной толщи претерпевает процесс метаморфизма, следует ожидать, что химические вещества, захороненные в снегу, будут постепенно «оседать», что подтверждается цветом нижнего слоя снега. Он имеет более серый оттенок, чем верхние слои.

С началом процессов снеготаяния снежная толща становится однородной, кристаллы приобретают форму снежных зерен диаметром от 1 до 3 мм. Химизм снежного покрова зависит также от характера растительности и условий рельефа.

Накопление загрязняющих веществ определяется физико-географическими условиями, присущими данному региону. Нами проводились натуральные исследования в г. Брянске, который имеет сложный овражно-балочный рельеф. В этом плане памятники природы — овраги Верхний и Нижний Судки могут рассматриваться как своеобразная модель для изучения антропогенной нагрузки на крупный промышленный город со сложным рельефом, однако именно особенности овражно-балочного рельефа во многом усложняют решение этой задачи.

Проблема оценки характеристик загрязнения снежного покрова в овражно-балочных условиях сложна и многопланова, поскольку требует учета множества природных факторов: абсолютных отметок, ориентации и крутизны склонов, особенностей ветрового режима, типа подстилающей поверхности, растительности, микрорельефа [4].

Вопросы влияния антропогенных факторов на распределение, режим и загрязнение снежного покрова в пониженных формах рельефа изучены недостаточно. Это связано с необходимостью постановки трудоемких натурных наблюдений на репрезентативных участках, достаточно полно отражающих присущее данной форме рельефа разнообразие локальных условий формирования и загрязнения снежной толщи. Поэтому особую актуальность приобретает поиск и применение точных экспрессных и комплексных методов анализа снежного покрова, которые дают интегрирующие показатели качества окружающей среды крупного города со сложным рельефом.

Была поставлена цель — изучить пространственные закономерности распределения снежного покрова на территории со сложным рельефом для определения ретроспективных и перспективных аэротехногенных нагрузок на момент максимального снегонакопления на любом участке исследуемой территории.

При проведении снегосъемок на территории исследований применялся маршрутный метод.

Основными загрязнителями, содержащимися в снежном покрове, являются ртуть, свинец, кадмий, цинк, медь, никель и другие тяжелые металлы. Кроме того, высокий уровень загрязнения может быть обусловлен

присутствием в снежном покрове и гидросфере анионов (хлоридов, сульфатов, сульфидов, нитратов и др.), катионов (NH_4^+ , содержащих хром (III) и хром (VI), взвешенных и органических веществ, нефтепродуктов и синтетических ПАВ и др.).

Количество загрязняющих веществ в снежном покрове существенно изменяется и зависит от многих факторов: времени года, наличия других загрязняющих веществ в системе. Однако информации о содержании химических соединений в снежном покрове недостаточно для оценки степени токсичности и опасности для окружающей среды, так как при комбинированном воздействии веществ на биологические объекты эффект может суммироваться, резко усиливаться или, наоборот, снижаться. Поэтому более полная оценка качества окружающей среды может быть получена только в процессе комплексных исследований, включающих определение загрязнения среды и изучение его воздействия на биологические объекты.

Гидробиологический мониторинг имеет несомненные преимущества при контроле общего экологического состояния объекта, давая интегральную оценку антропогенного воздействия на него. Гидрохимические методы позволяют идентифицировать тип загрязнений, вызывающих изменения состояния объекта, что значительно труднее определить с помощью гидробиологических методов.

В настоящее время общепринятой концепцией является создание систем мониторинга, основанных на комплексном использовании наблюдений по физическим, гидрохимическим и гидробиологическим показателям².

В работе основным методом оценки антропогенного загрязнения объекта явилось определение общей химической токсичности (ОХТ) с использованием биосенсора — гибрида морских люминесцентных бактерий (*Photobacterium Phosphoreum*) и кишечной палочки (*Echerihija Coli*), созданного методом генной инженерии и известного как препарат «ЭКО-ЛЮМ». Действие данного препарата основано на способности гибрида изменять люминесценцию в зависимости от токсичности среды. Данный метод, основанный на биотестировании, позволяет достаточно быстро оценить общую токсичность среды.

Отбор проб снежного покрова проводился в период начального снегонакопления — в декабре и в период максимального снегонакопления — в первой декаде марта. Выбор точек отбора проб осуществлялся осенью перед установлением снежного покрова с целью определения максимально характерных участков, разделенных по видовому составу растительного покрова, высоте участка местности и крутизне склонов.

Отбор проб проводился пробоотборником, изготовленным из стекла и тщательно продезинфицированным на полную глубину снежного покрова. Пробы хранились в неотапливаемом помещении в герметично закрытых пробоотборниках. Затем при комнатной температуре в течение 12...16 ч снег таял, и сразу же пробы пропускались через фильтр «синяя лента». Фильтрат анализировался на токсичность по ранее описываемой методике.

Помимо ОХТ определяли рН среды, содержание анионов Cl^- и NO_3^- и катиона NH_4^+ . Выбор именно этих параметров основывался, с одной стороны, на том, что определение рН и Cl^- обязательно при гидромониторинге, с другой стороны, наличие нитратов (нитрата аммония, в частности) может привести к острому токсикозу, хроническому гастриту, холециститу, гепатохолециститу, токсико-аллергическому отеку легких. Нитраты

² Мидгли Д., Торренс К. Потенциометрический анализ воды. М.: Мир, 1980. 179 с.

способны восстанавливать в организме нитриты, что частично приводит к образованию мет гемоглобина. При употреблении в пищу воды, содержащей 50...100 мг/л нитратов, резко увеличивается содержание гемоглобина в крови. При 20...40 мг/л содержание мет гемоглобина у детей может возрастать до 5 %³.

Оценка степени содержания хлорид-ионов, нитрат-ионов и ионов аммония осуществлялась ионометрическим методом⁴ с применением соответствующих ионселективных электродов.

Перечень методик, применяемых для определения загрязняющих веществ в снежном покрове, приведен в таблице.

Методики, применяемые для определения загрязняющих веществ в снежном покрове

Загрязняющее вещество	Наименование метода
Сульфаты	Нефелометрический метод с хлоридом бария с образованием трудно-растворимого соединения в виде суспензии
Азот аммонийный	Фотометрический метод с реактивом Неслера, основанный на изменении интенсивности окрашивания комплексного соединения
Железо	Фотометрическое определение с 1-, 10-фенантролином, основанное на восстановлении железа (2+) и измерении интенсивности окрашивания комплекса железа
Хром (6+)	Фотометрическое определение с дифенилкарбозидом с образованием комплексного соединения и измерением интенсивности его окрашивания
Марганец	Фотометрическое определение с формальдоксимом с образованием комплекса и изменением интенсивности его окрашивания
Цинк, медь, свинец, кадмий	Инверсионный вольт-амперометрический метод

Экспериментальные результаты определения общей химической токсичности снежного покрова городских оврагов представлены на рис. 1. Приведенные данные по ОХТ свидетельствуют об увеличении содержания поллютантов в снежном покрове в марте по сравнению с декабрем. Так, например, в точке 1 (низовье оврага Нижний Судок) показатель ОХТ увеличился с 20,8 % в декабре до 74,1 % в марте. При возрастании

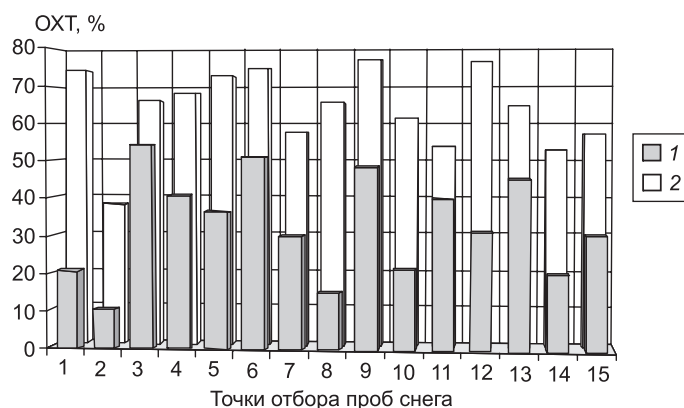


Рис. 1. Общая химическая токсичность снежного покрова
1 — пробы, отобранные в декабре; 2 — пробы, отобранные в марте

³ Вредные вещества в промышленности: справочник. М.: Химия, 1976. 623 с.

⁴ Мидгли Д., Торренс К. Потенциометрический анализ воды. М.: Мир, 1980. 179 с.

этого показателя аналогичным образом изменяется содержание хлорид-ионов в снеге.

Содержание хлорид-ионов не превышает величины ПДК = 350 мг/л. Аналогичным образом с увеличением показателя ОХТ возрастает величина рН. Содержание NO_3^- в различных пробах снежного покрова в оврагах Верхний и Нижний Судки оставалось практически постоянным и равнялось 8,3 мг/л, что значительно ниже ПДК = 50 мг/л. Содержание в снеге ионов NH_4^+ изменяется в пределах 5...31 мг/л и не коррелирует с показателем общей химической токсичности. Количество этих ионов в некоторых пробах превосходит допустимые нормы ПДК = 7,2 мг/л.

Очевидный интерес представляет сравнение показателя загрязненности снега и воды. Данные по ОХТ для участков, где осуществлялся отбор проб воды и снега, приведены на рис. 2. Из них можно сделать вывод о том, что ОХТ для водных объектов ниже, чем для снежного покрова для одной и той же точки отбора пробы. Последнее обстоятельство еще раз подтверждает тот факт, что снег — это природный аккумулятор загрязнителей.

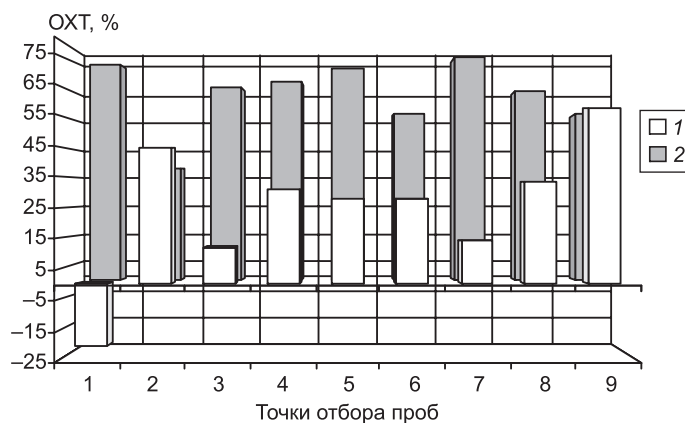


Рис. 2. Общая химическая токсичность воды и снежного покрова
1 — ОХТ воды; 2 — ОХТ снежного покрова

Для определения зависимости между концентрациями загрязняющих веществ в снежном покрове и в атмосферном воздухе крупного города на сложном рельефе проведены исследования в центральной части Советского района г. Брянска. Результаты наблюдений загрязнения атмосферного воздуха получены от стационарного поста. Из всей базы данных выбраны значения за зимние периоды, соответствующие годам проведения снегомерных съемок. По отобранной выборке рассчитаны средние значения концентрации загрязняющих веществ в атмосферном воздухе за период залегания снежного покрова, ряды которых сопоставлены с рядами концентраций загрязняющих веществ в снежном покрове на конец зимнего периода. При этом определялись следующие загрязняющие вещества: диоксид серы (в атмосферном воздухе) и сульфаты (в снежном покрове); диоксид азота (в атмосферном воздухе) и азот аммонийный (в снежном покрове); хром, свинец, марганец, железо, медь, кадмий (рис. 3–10).

Выводы. 1. Приведенные в работе данные свидетельствуют об эффективности использования применяемых методов для сравнительной экологической оценки антропогенного загрязнения снежного покрова, гидросферы и атмосферы в крупном городе со сложным рельефом.

2. Снежный покров исследуемой территории (показатель ОХТ) является токсичным для человека.

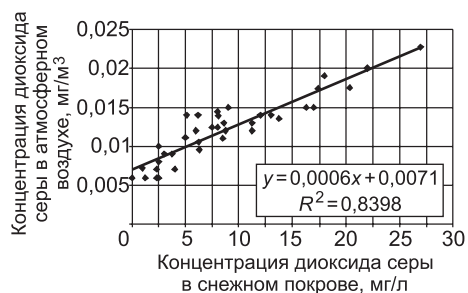


Рис. 3. Связь концентрации диоксида серы в снежном покрове и в атмосферном воздухе ($\kappa = 0,79$)

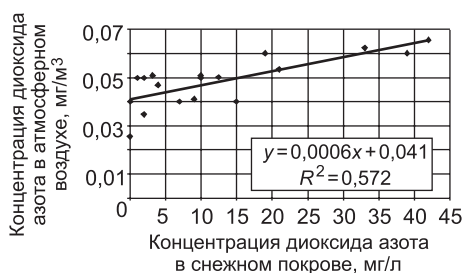


Рис. 4. Связь концентрации диоксида азота в снежном покрове и в атмосферном воздухе ($\kappa = 0,69$)

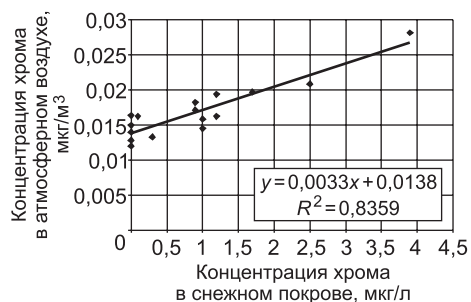


Рис. 5. Связь концентрации хрома в снежном покрове и в атмосферном воздухе ($\kappa = 0,71$)



Рис. 6. Связь концентрации свинца в снежном покрове и в атмосферном воздухе ($\kappa = 0,62$)

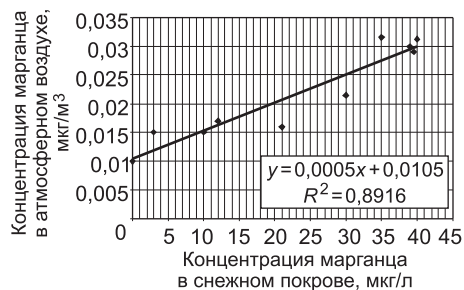


Рис. 7. Связь концентрации марганца в снежном покрове и в атмосферном воздухе ($\kappa = 0,86$)

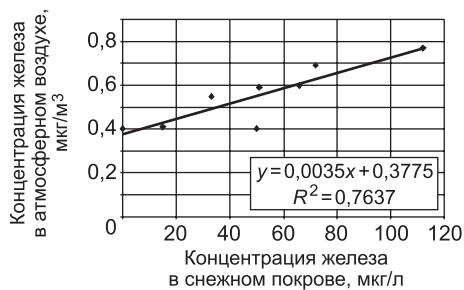


Рис. 8. Связь концентрации железа в снежном покрове и в атмосферном воздухе ($\kappa = 0,91$)



Рис. 9. Связь концентрации меди в снежном покрове и в атмосферном воздухе ($\kappa = 0,78$)

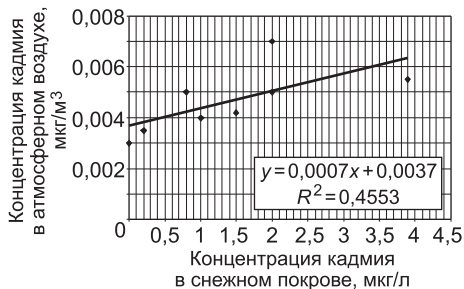


Рис. 10. Связь концентрации кадмия в снежном покрове и в атмосферном воздухе ($\kappa = 0,63$)

3. С увеличением показателя ОХТ возрастают содержание хлорид-ионов, величина рН, а содержание в снеге ионов NH_4^+ , напротив, не коррелирует с показателем ОХТ.

4. Доказана связь и проведено сравнение показателей загрязненности снега и воды. ОХТ для водных объектов ниже, чем для снега.

5. Выявлены линейные зависимости содержания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе и снежном покрове по диоксиду серы, диоксиду азота, хромуму, свинцу, марганцу, железу, меди и кадмию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Василенко, В.Н. Мониторинг загрязнения снежного покрова [Текст] / В.Н. Василенко и др. — Л. : Гидрометеиздат, 1985. — 184 с.
2. Евсифеев, А.В. Эколого-геохимический анализ изменения состояния природной среды Севера Евразии : дис. ... д-ра геогр. наук [Текст] / А.В. Евсифеев. — М., 1992. — 627 с.
3. Иванов, А.В. Теория криогенных и гляциогенных гидрохимических процессов [Текст] / А.В. Иванов // ИМТ. Гляциология. — Т. 5. — М. : ВИНТИ, 1987. — 236 с.
4. Раткин, Н.Е. Роль снежного покрова в загрязнении ландшафтов Мурманской области [Текст] / Н.Е. Раткин, Т.Д. Макарова // Эколого-географические проблемы Кольского Севера. — Апатиты : Изд-во Кольского науч. центра РАН, 1992. — С. 20–35.

*СЕНЮЩЕНКОВА И.М., канд. техн. наук, доц.; E-mail: irina-sen811@yandex.ru
Московский государственный строительный университет
СМИРНОВА Т.Г., канд. геогр. наук, доц.; E-mail: geolog305@yandex.ru
Московский государственный строительный университет*

Получено 02.07.10

Senyuschenkova I.M., candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: irina-sen811@yandex.ru, Moscow State University of Civil Engineering, Russia
Smirnova T.G., candidate of geographical sciences, assistant professor; E-mail: geolog305@yandex.ru, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

GEOCHEMICAL STUDY OF THE SNOW COVER OF URBAN AREAS IN COMPLEX TOPOGRAPHY

The paper discusses issues of contamination of snow cover urban ravine areas. The main indicators of the quality of the snow cover at the beginning of accumulation and at the end of snowmelt. Established a linear pattern of contaminants in the air and snow cover.

Key words: urban ravines, snow cover, pollution.

REFERENCES

1. Vasilenko, V.N. Pollution monitoring snow cover [Text] / V.N. Vasilenko et al. — L. : Gidrometeoizdat, 1985. — 184 p.
2. Evsifeev, A.V. Ecological and geochemical analysis of changes in the natural environment of the North Eurasia: dis. ... doctor of geographical sciences. — M., 1992. — 627 p.
3. Ivanov, A.V. Theory of cryogenic and glaciogenous hydrochemical processes [Text] / A.V. Ivanov // BMI. Glaciology. — Т. 5. — М. : VINITI, 1987. — 236 p.
4. Rutkin, N.E. The role of snow cover in the contaminated areas of the Murmansk region [Text] / N.E. Rutkin, T.D. Makarova // Ecological-geographical problems of the Kola Peninsula. — Apatity : Acad Kol Science Centre RAS, 1992. — P. 20–35.

УДК 726.54(571.56)

Л.Н. ВОЛЬСКАЯ, С.В. БЕЛОЛЮБСКАЯ

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ САКРАЛЬНОГО ЗОДЧЕСТВА В ЯКУТИИ

Рассмотрены основные этапы возведения сакральных сооружений на территории Якутии. На строительство деревянных, а особенно каменных храмов повлияли суровые климатические условия края. Продолжая общерусские традиции, архитектурно-конструктивные решения храмов Якутии обладают своими специфическими особенностями.

Ключевые слова: этапы возведения, расположение храмов, конструктивные особенности, реставрация и новое строительство.

Распространение православия и строительство сакральных сооружений на территории Якутии связаны с масштабным освоением в XVII веке этого сурового и малонаселенного края русскими людьми. Огромные пространства северо-восточной Сибири, заселенные полукочевыми и кочевыми племенами «инородцев», привлекали природными богатствами и в течение короткого времени были присоединены к Московскому государству. Освоение территории Якутии началось с возведения в 1632 году Ленского (Якутского) острога. Якутск, основанный как ясачное поселение, с 1638 года становится административным центром Якутского уезда и до конца XVIII века остается единственным городом на всей территории северо-восточной Сибири. С образованием Якутской области и разделением ее территории, составляющей примерно треть Сибири, на 5 округов (Якутский, Олёкминский, Вилюйский, Среднеколымский и Верхоянский) статус городов получили Олёкминск (1783 г.), Вилюйск (1783 г.), Среднеколымск (1805 г.) и Верхоянск (1805 г.). Города эти выросли из острогов и ясачных зимовий по берегам крупных сибирских рек: Лены, Вилюя, Колымы и Яны.

Следует отметить, что с приходом русских в Якутию местное население постепенно стало принимать православие, и к началу XIX века христианизация народов Якутии завершилась. Образование самостоятельной Якутской епархии в 1870 году способствовало быстрому развертыванию строительства церквей и часовен.

Вплоть до середины XX столетия в Якутии было всего 5 городов, но Якутск оставался самым крупным городом северо-восточной Сибири. К началу XX века сформировалась своеобразная панорама Якутска, построенная на противопоставлении вертикальных доминант храмов и колоколен и распластанной горизонтали природной среды и низкой деревянной застройки. Благодаря большому количеству церквей (9 церквей, включая монастырские) «речной фасад» города, насыщенный вертикалями крепостных башен, храмов и колоколен, имел неповторимый живописный силуэт (рис. 1).

Храмовые комплексы сложились и в Олёкминске (две церкви и колокольня), Вилюйске (три церкви), а также на берегу Лены в поселке Покровск (три церкви) на месте упраздненной Покровской пустыни Спасского монастыря. Расположенные по берегам крупных водных артерий —

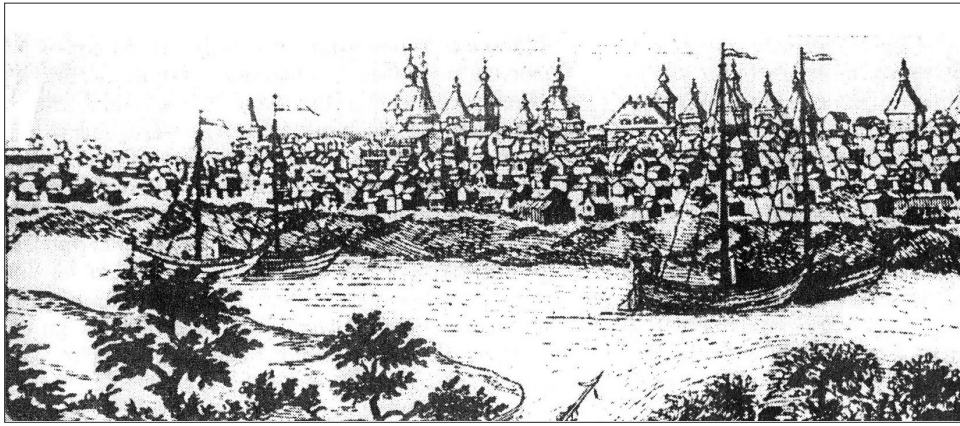


Рис. 1. Вид г. Якутска в начале

Лены и Вилюя храмовые комплексы формировали «речной фасад» этих поселений.

Существовал и иной принцип расположения церквей в населенных пунктах. Сами поселения складывались постепенно на местах зимних родовых стойбищ. Как правило, якуты расселялись по одному-два, реже по три-четыре хозяйства на одном «аласе». Такие поселения были разбросаны по тайге на 10...15 км друг от друга. Церковь или часовня ставились на равноудаленном расстоянии от поселений. Со временем, по мере разрастания поселка, церковь оказывалась его центром, но сохраняла свою обособленность за счет территории кладбища, которое по сложившейся русской традиции располагалось возле приходской церкви. Благодаря своему островному положению церковь хорошо обозревалась из любой точки поселка, являясь естественным ориентиром среди низкой жилой застройки.

Многие сельские церкви наделялись сенокосной землей в размере 33 десятин, священнослужителям строились жилые дома. Кроме того, церкви являлись центрами просвещения местного населения и имели церковно-приходские школы и библиотеки. Особенно богаты жилыми и хозяйственными постройками были городские церкви. Так, например, около Никольской церкви в Якутске были расположены два причтовых дома, три церковных дома, четыре амбара, сеновал и сторожка.

За весь дореволюционный период в Якутии было построено огромное количество церквей и часовен. В 1919 году, в последний год своего существования, Якутская духовная консистория контролировала деятельность 134 церквей в 330 приходах. На сегодняшний день в республике образовано 52 прихода и действует 29 церквей (см. таблицу).

На территории Якутии возводились преимущественно деревянные храмы. До революции было построено всего 9 каменных храмов, 6 из которых находились в Якутске. До наших дней сохранилось несколько деревянных храмов, построенных в XIX веке по «образцовым» проектам

под «каменное дело». Исключение составляет Спасо-Зашиверская деревянная шатровая церковь (1700 г.), построенная в древних традициях русского Севера. К сожалению, безвозвратно утеряны пре-

Количество действующих церквей в Якутии

Год	Приходы	Церкви	В том числе каменные	Часовни	Молитвенные дома	Монастыри
1919	330	134	9	156	—	1
1993	2	1	—	—	1	—
2010	52	29	13	35	12	1



XVIII в. (с гравюры М. Махаева)

красные двухэтажные «барочные» церкви Якутска (1794 г.), Олёкминска (1787 г.), Покровска (1787 г.) и Вилюйска (1804 г.), построенные в конце XVIII века, облик которых запечатлен на фотографиях конца XIX — начала XX веков.

Особого внимания заслуживает строительство каменных храмов, на примере которых можно проследить формирование конструктивных и архитектурных особенностей, продиктованных суровыми климатическими условиями Якутии.

Строительство каменных православных храмов началось с возведения собора во имя Живоначальной Троицы (1708–1728 гг.) на территории деревянного Якутского острога. Первые каменные храмы XVIII века были холодными и возводились по традиционному конструктивному принципу с массивными кирпичными стенами толщиной до 1,5 м на широком ленточном фундаменте из крупного бутового камня, перекрытыми кирпичными сомкнутыми сводами. Попытка построить двухэтажный каменный Никольский храм (1791 г., разобран после 1839 г.) в стиле лучших образцов «сибирского барокко» не увенчалась успехом, так как строительство велось без учета особенностей вечномёрзлых грунтов и привело к осадке фундаментов и деформации стен и сводов здания. При возведении храмов в XIX веке были приняты конструктивные решения, характерные для деревянного или гражданского строительства, где применялись балочные перекрытия с плоскими потолками. Вследствие сезонного оттаивания грунтов под зданием в церквях стали устраивать деревянные полы, уложенные по деревянным балкам над холодным подпольем.

Архитектура и композиция храмов Якутии, продолжая общерусские традиции, приспосабливались к более суровым природно-климатическим условиям края и приобретали свои особенности, отличаясь предельно простым силуэтом и четкими формами основных объемов.

В советский период церкви были уничтожены или перестроены и приспособлены под различные хозяйственные нужды. Из 330 действующих приходов на территории Якутии осталось только два: в Якутске и Олёкминске.

В Якутии исторический интерес к церковным зданиям возник, когда на далекой реке Индигирке архитектором А.В. Ополовниковым была обнаружена и исследована деревянная Спасская Зашиверская церковь. В 1972 году церковь была перевезена в Новосибирск, в музей под открытым небом Академгородка.

Строительство современных православных храмов и реставрация сохранившихся церковных зданий на территории Якутии возобновились в

конце XX века с возрождения в 1993 году Якутской епархии Русской Православной Церкви.

В 1970-х годах с большими трудностями было получено разрешение на строительство новой деревянной церкви для православной общины в городе Якутске. Участок под строительство церкви был выделен в среде деревянной частной застройки на окраине города рядом с молитвенным домом. Церковь была построена в 1980 году. Вплоть до возрождения самостоятельной Якутской епархии новых церковных зданий на всей территории края не возводилось.

Из шести сохранившихся каменных храмов, являющихся ценным архитектурным наследием, на сегодняшний день отреставрированы Никольская (1852 г.) и Преображенская (1845 г.) церкви в Якутске и Спасский собор (1870 г.) в городе Олёкминске. В 2010 году заканчивается сложная реставрация Богородицкой церкви (1773 г.) в Якутске (рис. 2). При восстановлении церковных зданий современные технические решения, конструкции и материалы применяются тактично, не нарушая исто-

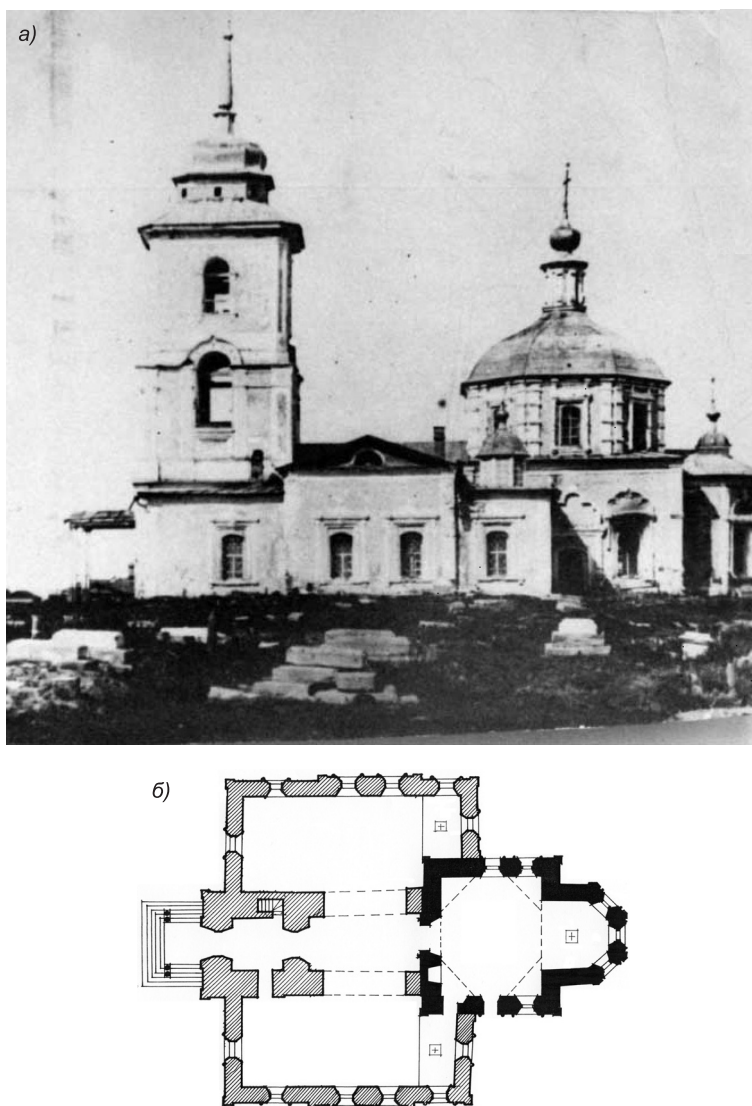


Рис. 2. Богородицкая церковь, 1773 г. (г. Якутск)

а — фасад церкви на фото начала XX в., б — план церкви с пристройкой XIX в.

рического облика памятников архитектуры. Самыми сложными и кропотливыми явились работы по укреплению фундаментов зданий и сохранению в грунтах основания режима вечной мерзлоты. Для увеличения прочности ленточных фундаментов применяется метод цементации путем инъектирования цементным раствором пустот и трещин в бутовой кладке. Для уменьшения теплопередачи от здания и утепления конструкции пола в цокольной части применяется эффективный утеплитель — экструдированный пенополистирол. В качестве дополнительной меры защиты фундаментов по периметру здания выполняется теплозащитная отмостка из того же материала.

За советский период были утрачены не только многочисленные храмовые здания, но и сам опыт проектирования и строительства церквей. Развитие церковной архитектуры было прервано революцией, и сейчас приходится заново учиться строить храмы, обращаясь к накопленному опыту мастеров прошлого и одновременно опираясь на достижения современной строительной науки. Если сопоставить способы строительства церковных зданий в дореволюционный период с современными техническими решениями, то можно выявить основную проблему, которая всегда существовала в Якутии — это строительство зданий в условиях вечной мерзлоты.

Строительство новых храмов в Якутии началось с 1993 года в крупных промышленных городах и поселках южной и юго-западной Якутии, но в этот период центральные районы городов Нерюнгри, Мирного, Алдана были уже застроены, а на перспективу строительство храмов было не запланировано. При назревшей необходимости возведения храмов площадки для строительства выбирались случайные, удаленные от центров городов. На небольших территориях едва хватало места для храма, а для размещения церковных комплексов свободных участков не оставалось (рис. 3).



Рис. 3. Свято-Троицкая церковь, 2000 г., арх. С. Юрасова, г. Мирный

Начиная с 2000 года, когда православие обрело определенную силу и влияние, при корректировке генеральных планов городов и поселков стали предусматривать территории для строительства церквей. В генеральных планах при размещении церковных зданий стали отдавать предпочтение местам возле пересечения магистралей, «закрывая» храмовым зданием перспективу улиц (новые храмы в г. Нерюнгри и пос. Айхал). Если город или поселок расположен на реке, для храма выбирается береговая линия застройки (г. Покровск и Ленск, пос. Жиганск и Хандыга). Удачным примером строительства храма на историческом месте является Николаевская церковь в городе Нюрба.



Рис. 4. Инокентьевская церковь, 2001 г., арх. Г. Власов, г. Ленск

За короткий период с 1993 по 2009 год на территории Якутии было построено и отреставрировано 29 церковных зданий. Один за другим возводятся новые храмы в различных районах республики: каменные церкви построены в городах Нерюнгри (1993 г.), Мирном (2000 г.), Алдане (2000 г.), Покровске (2007 г.), Нюрбе (2009 г.), а также в поселках Чульман (2000 г.), Хандыга (2006 г.) и Айхал (2009 г.).

Архитектура новых храмов соответствует каноническим церковным традициям. Прежде всего это касается планировочной структуры храмов и композиционного построения доминирующих объемов. Традиционной остается и стеновая конструктивная система, применяемая в церковных зданиях. При конструировании новых каменных храмов используются современные технические решения (свайные фундаменты, металлические и железобетонные большепролетные конструкции), а также эффективные теплоизоляционные материалы (пенополистирол, изовер), стеклопакеты для заполнения оконных проемов.

Новые храмы Якутии эклектичны. Создавая храмы для новых городов и поселков, современные архитекторы, не имея личного опыта проектирования церковных зданий, обращались к образцам древнерусского зодчества. Как и по всей России, в Якутии строительство храмов проходит

путь от эклектики с попытками самовыражения к еще не сложившемуся, но складывающемуся русскому стилю. Возведение новых православных храмов в городах Якутии основывается не только на применении новейших конструктивных приемов и современных материалов, но и традициях русской православной культуры.

ВОЛЬСКАЯ Л.Н., д-р арх., проф.

Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия

БЕЛОЛЮБСКАЯ С.В., асп.

Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия

Получено 22.06.10

Wolskaya L.N., doktor of architecture, professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Art, Russia

Belolyubskaya S.V., post-graduate student, Novosibirsk State Academy of Architecture and Art, Russia

ON THE SINGULARITIES OF SACRAL ARCHITECTURE IN YAKUTIA

The basic stages of the construction of sacred buildings in the territory of Yakutia are reflected in the article. The harsh climatic conditions of the region influenced construction of wooden and stone temples in particular. Continuing the all-russian traditions architectural and design solutions of temples of Yakutia possess their own specific features.

К e y w o r d s: stages of construction, the location of temples, design features, restoration and new construction.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 624.01:691-419

**В.В. АДИЩЕВ, В.Д. КУРГУЗОВ, В.В. РООТ, С.А. ПЛЯШКЕВИЧ,
А.Ю. САВЧЕНКО**

МНОГОСЛОЙНЫЕ ТЕПЛОЭФФЕКТИВНЫЕ БЛОКИ В СОВРЕМЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Рассматривается возможность использования многослойных теплоэффективных блоков в современном строительстве в качестве как несущих конструкций малоэтажных зданий, так и ограждающих самонесущих конструкций высотных зданий. Проведен анализ имеющегося опыта эксплуатации конструктивных элементов такого типа. Определены физико-механические характеристики материалов. Выполнено математическое моделирование различных фрагментов стеновых конструкций с применением программно-вычислительных комплексов.

Ключевые слова: теплоэффективный блок, несущая способность, трещина, усадка, кинематические воздействия, мало- и многоэтажное строительство, физико-механические свойства блоков и клеящего раствора.

В настоящее время в России достаточно широко освоен выпуск трехслойных теплоэффективных блоков, используемых в малоэтажном строительстве. Блоки имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными материалами: высокое сопротивление теплопередаче, значительное сокращение сроков возведения стен, снижение трудоемкости строительных работ. Однако массовое использование такого продукта высокой заводской готовности сдерживается отсутствием необходимых нормативных характеристик материалов и методик расчета ограждающих конструкций из трехслойных блоков. Общий вид теплоэффективного блока изображен на рис. 1, 2.



Рис. 1. Рядовой многослойный блок БР40-30-20 (400×300×200 мм)

Применение кладки из многослойных блоков типа «ТЕПЛОСТЕН» в стенах зданий и сооружений малой этажности основано на опыте возведения и эксплуатации каменных конструкций. Кладка из них по многим характеристикам отличается от традиционных видов кладки, и существующие методы расчета не адекватны реальным условиям деформирования многослойных блоков. Основная задача данного ис-

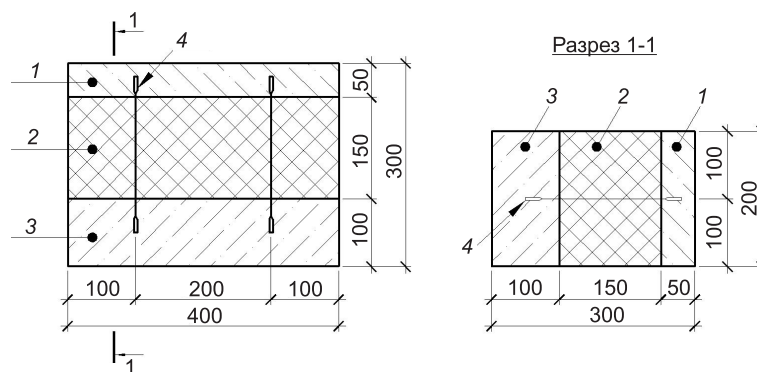


Рис. 2. Рядовой многослойный блок БР40-30-20 (400×300×200 мм)
 1 — фасадный (фактурный) слой. Бетон класса В5. Удельный вес 16 кН/м³; 2 — утеплитель — пенополистирол ПБС-25 по ГОСТ 15588–86; 3 — внутренний (несущий) слой — поризованный керамзитобетон класса В5–В10. Удельный вес 10 кН/м³; 4 — базальто- или стеклопластиковый арматурный стержень

следования — оценка напряженно-деформированного состояния (НДС) многослойных блоков в стенах зданий. При этом для многоэтажных зданий необходим учет специфических факторов (ветровое воздействие, деформации каркаса).

Сформировавшиеся представления о характере напряжений, возникающих в каменных кладках, основаны на наблюдениях за поведением реальных зданий и сооружений, а также за разрушением экспериментальных образцов. Традиционный подход к оценке несущей способности и эксплуатационной пригодности конструкций предполагает расчеты по двум группам предельных состояний. Такой подход применительно к кладке из многослойных блоков несостоятелен, поскольку:

- несущая способность кладки определяется прочностными характеристиками внутреннего (несущего) слоя;

- деформативность (долговечность) характеризуется главным образом состоянием теплоизолирующего и фактурного (фасадного) слоев.

Теплотехнические характеристики кладки в значительной степени определяются состоянием фасадного слоя и растворо-клеевых швов. Поэтому необходимо проводить «сквозной» расчет НДС в несущем и фасадном слоях от начала нагружения до образования трещин и потери несущей способности.

Обзор научных публикаций позволяет сделать вывод, что методики оценки несущей способности и долговечности ограждающих конструкций, выполненных из многослойных блоков типа «ТЕПЛОСТЕН», отсутствуют. Не проводился мониторинг состояния таких конструкций в течение значимых периодов эксплуатации (несколько лет). В исследовании теплоэффективного блока [1] используется именно традиционный подход, базирующийся на нормативных документах [2, 3]. Причем авторы указывают, что СНиП не позволяет установить значения «упругой характеристики α для кладки из трехслойных блоков из поризованного керамзитобетона с термовкладышами». Данные экспериментов по определению прочности материалов, приведенные в [1], имеют большой разброс: от -35 до $+59$ %. Поэтому расчет фрагментов ограждающих конструкций из таких блоков с применением условных средних значений прочности кладки при центральном сжатии интереса не представляет.

Анализ напряженно-деформированного состояния каменной кладки показывает, что НДС ее компонентов зависит в первую очередь от характеристик, определяющих деформативность материалов (модуля упругости, коэф-

фициента Пуассона). Возможно значительное влияние клеевых соединений на НДС блоков. Материалы, из которых изготовлены исследуемые многослойные блоки, имеют различные сопротивления при растяжении и сжатии. Максимальные нормальные или касательные напряжения являются определяющими в критериях прочности кладки из рассматриваемых блоков.

Развитие вычислительной техники и численных методов расчета позволяет по-новому подойти к анализу напряжений в кладке с применением методов математического моделирования. Для анализа НДС при расчетах зданий и сооружений широко применяются программные комплексы типа SCAD, «Лира», MSC.MARC, которые реализуют метод конечных элементов.

В 2007–2008 годах авторами были проведены визуальные обследования нескольких малоэтажных объектов, имеющих повреждения. Наиболее характерным объектом оказалась стена склада длиной 25 м (рис. 3). В 2007 году была выложена часть стены высотой кладки 1,5 м (7 блоков). В стене образовались вертикальные трещины с периодичностью по длине в средней части стены около 3,3 м. Расстояние от торца до первой трещины порядка 5 м. В 2008 году стена была достроена, старая кладка продолжена тремя слоями блоков, затем был устроен бетонный пояс и продолжена кладка до кровли. Старые трещины развились вверх по вертикали до бе-



Рис. 3. Вертикальная трещина в стене из блоков

тонного пояса. Трещины образовались в ненагруженных фрагментах стены, видимых осадок фундамента стены не обнаружено. Следовательно, причинами образования трещин могут быть либо температурные воздействия, либо усадка. Так как трещины образовались в период, когда температура воздуха была положительной, то единственной причиной их образования может быть усадка материалов. Как видно на фотографии (рис. 3), трещина проходит по разрушенным вертикальным швам, а фасадные слои блоков разорваны по линиям сопряжения разрушенных швов.

Таким образом, в качестве основной рабочей гипотезы можно принять следующее предположение: усадочные деформации приводят к возникновению значительных растягивающих напряжений в вертикальных и горизонтальных швах. Прочность вертикальных швов на растяжение в горизонтальном направлении, очевидно, ниже прочности на растяжение фасадного слоя и горизонтальных швов. Следовательно, вертикальные швы разрушаются в первую очередь, затем происходит разрыв горизонтальных швов. В фасадном блоке, разделяющем разрушенные вертикальные швы, возникают растягивающие напряжения. Если прочность адгезионной связи клеящего состава и бетона достаточно велика, то в блоке фасадного слоя образуется трещина нормального отрыва. В противном случае происходит разрушение (отслоение) горизонтального шва (рис. 4).



Рис. 4. Разрушение растворных швов в стене

Для определения прочностных и жесткостных характеристик материалов авторами были проведены лабораторные испытания: кубов габаритами 40×40×40 мм; балок габаритами 40×40×160 мм.

Исследовали несущий, фасадный слои и клеевой раствор (прочность на растяжение и контроль значений модуля упругости).

Согласно проведенным испытаниям и анализу исходных данных были приняты следующие характеристики материалов (табл. 1).

Таблица 1
Характеристики материалов

Наименование слоя	Модуль упругости, МПа	Предел прочности, МПа	Удельный вес, кН/м ³
Фасадный слой	10 650	3,30	16
Утеплитель	8	0,105	0,25
Внутренний (несущий) слой	8450	2,96	10
Клеевой раствор	8267	3,07	10
Гибкие связи	71 000	—	12

С балками из клеевого раствора проведены испытания по определению усадочных деформаций швов. Величина усадочных деформаций, возникших в течение 30 дней после формования, оказалась равной 1 мм/м.

В расчете фрагмента стены многоэтажного здания учитывались следующие нагрузки: собственный вес элементов; ветровая нагрузка (без пульсационной составляющей); гололедные нагрузки; кинематическое воздействие (за кинематическое воздействие принимается смещение, возникающее за счет сдвиговых деформаций каркаса). Предельные перемещения каркаса здания ограничиваются исходя из конструктивных требований и принимаются в соответствии с табл. 22 в СНиП 2.01.07–85*.

Нагрузки, учитываемые при расчете фрагмента одноэтажного здания: собственный вес элементов; ветровая нагрузка.

Для оценки НДС были выбраны фрагменты стен:

- многоэтажного здания без оконного проема (фрагмент 1);
- многоэтажного здания с оконным проемом (фрагмент 2);
- двухэтажного здания (фрагмент 3, участки противоположных стен, соединенных перекрытием, рис. 5).

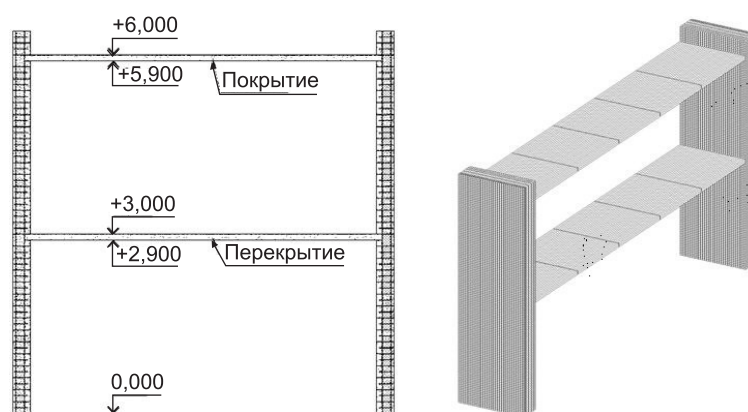


Рис. 5. Внешний вид фрагмента 3 (слева), расчетная схема (справа)

С применением ПК SCAD во фрагментах 1–3 определены значения напряжений, представленные в табл. 2. Максимальные усилия в анкерах фрагментов 1–3 соответственно 0,157; 0,165 и 0,138 кН.

Выполненные расчеты позволяют сделать следующие выводы.

1. Растягивающие и сжимающие напряжения в первом и втором фрагментах при отсутствии кинематического воздействия со стороны каркаса не превышают опытных значений предельных напряжений. Учет этого воздействия приводит к тому, что действующие напряжения значительно превышают предельные во всех слоях и растворных швах.

2. Растягивающие и сжимающие напряжения во фрагменте 3 (стены и перекрытие двухэтажного здания) от воздействия расчетных нагрузок не велики, имеется значительный резерв по несущей способности.

Ниже приводятся результаты численного моделирования НДС фрагментов кладки при усадочных воздействиях, а именно усадки растворных швов. Считается, что усадка происходит только в растворных швах. Воздействие от усадки заменяется эквивалентным температурным воздействием на растворные швы. Усадка растворного шва равна 1 мм/м, что соответствует деформации порядка 10^{-3} . Чтобы в материале типа бетона возникла такая деформация сжатия, его температура должна понизиться до -80 °С. В стесненных условиях кладки усадочные деформации должны быть меньше, поэтому для моделирования выбраны значения -40 и -70 °С.

Напряжения в элементах кладки

Элемент		N_x , МПа		N_y , МПа		N_z , МПа		T_{xz} , МПа
		Max+	Max-	Max+	Max-	Max+	Max-	Max
Фрагмент 1	Фасадный слой	1,128	-1,138	0,119	-0,078	13,31	-12,194	3,012
	Несущий слой	0,829	-0,834	0,226	-0,093	10,232	-9,624	2,305
	Клеевой раствор	1,49	-1,495	1,636	-1,07	1,483	-1,254	3,212
Фрагмент 2	Фасадный слой	10,762	-10,717	0,638	-0,647	15,044	-14,587	5,327
	Несущий слой	8,025	-8,044	0,687	-0,71	11,398	-12,009	4,101
	Клеевой раствор	1,359	-1,366	0,21	-0,177	1,587	-1,604	0,976
Фрагмент 3	Фасадный слой	0,039	-0,059	0,007	-0,017	0,19	-0,457	0,024
	Несущий слой	0,039	-0,059	0,007	-0,017	0,19	-0,457	0,024
	Клеевой раствор	0,14	-0,024	0,013	-0,011	0	0	0

Расчет выполнен с помощью вычислительного комплекса MSC.MARC. Геометрическое моделирование и обработка результатов расчета выполнены с использованием программы MSC.PATRAN.

Рассмотрено два фрагмента исследуемой кладки:

— стенка размерами $16 \times 14,2$ м, толщиной 300 мм, под действием собственного веса и температуры ($T = -40$ °С);

— стенка размерами $3,2 \times 3$ м, толщиной 300 мм, с оконным проемом $1,6 \times 1,4$ м, под действием вертикального давления на несущий слой 0,15 МПа, с учетом собственного веса и температуры ($T = -40$ и -70 °С).

Расчетные области разбиваются на трехмерные изопараметрические восьмиузловые конечные элементы с длиной ребра 25 мм. Швы между блоками моделируются пластинами, которые разбиваются на плоские четырехузловые элементы.

Моделирование процесса деформирования и образования трещин в результате усадки подтвердило рабочую гипотезу, принятую на основе анализа повреждений в обследованных объектах. В кладке достаточно большой протяженности (рис. 6) при усадке клеевых швов возникают интенсивные растягивающие напряжения в швах и сжимающие напряжения в слоях блоков. Растягивающие напряжения в вертикальных швах ($\approx 3,433$ МПа) приводят к их разрушению. В сечении с разрушенными вертикальными швами наиболее нагруженными оказываются горизонтальные растворные швы, а после их разрушения — фасадные слои блоков, в которых возникают растягивающие напряжения порядка 2,452 МПа, что приводит к их растрескиванию.

Расчет фрагмента заполнения проема между колоннами каркасного здания на воздействие усадки показывает, что значительные растягивающие напряжения не возникают, т.е. растрескивания быть не должно. По-другому ведет себя аналогичный фрагмент протяженной стены. В нем возникают значительные растягивающие напряжения (рис. 6) в растворных швах. При разрушении вертикальных и горизонтальных швов над блоком и под ним в блоке появляются большие растягивающие напряжения, приводящие к его разрушению (рис. 7).

Выполнено моделирование деформирования фрагментов стены двухэтажного здания и фрагмента ограждающей стены многоэтажного здания (до 10 этажей) при действии нормативных нагрузок (в том числе ветро-

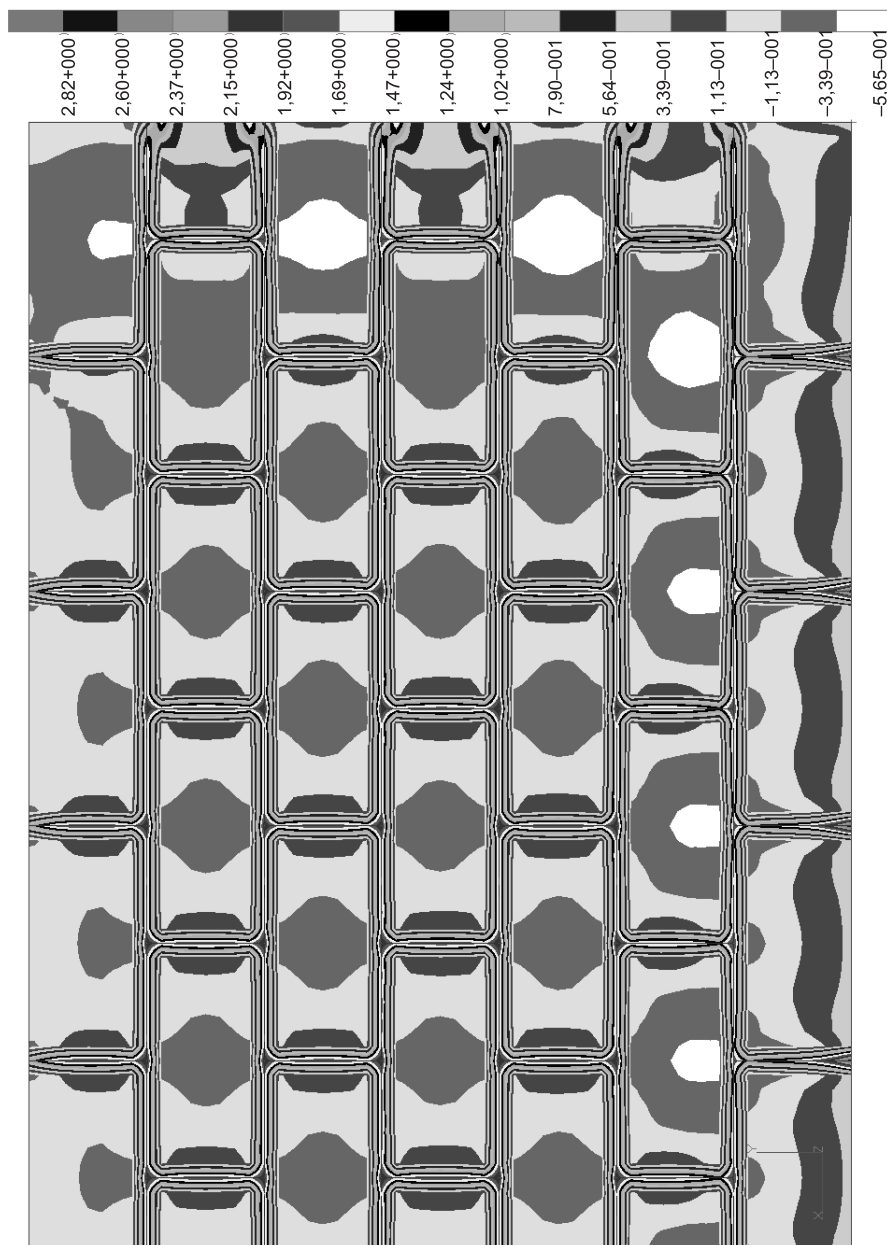


Рис. 6. Изополя горизонтальных напряжений в стене из блоков

вой). Для многоэтажного здания рассмотрено действие сдвиговой нагрузки, передающейся на фрагмент стены при предельно допустимых горизонтальных перемещениях элементов каркаса.

По результатам компьютерного моделирования сделаны следующие выводы.

1. Несущая способность ограждающих конструкций двухэтажного здания, выполненных из многослойных блоков, обеспечена при воздействии расчетных нагрузок. В то же время требования по эксплуатационной пригодности не обеспечены. Необходима разработка специальных мероприятий, устраняющих возможность образования усадочных трещин.

2. Несущая способность фрагмента стены многоэтажного каркасного здания не обеспечена при воздействии на нее сдвиговых усилий, возникающих при совместном деформировании стены и каркаса.

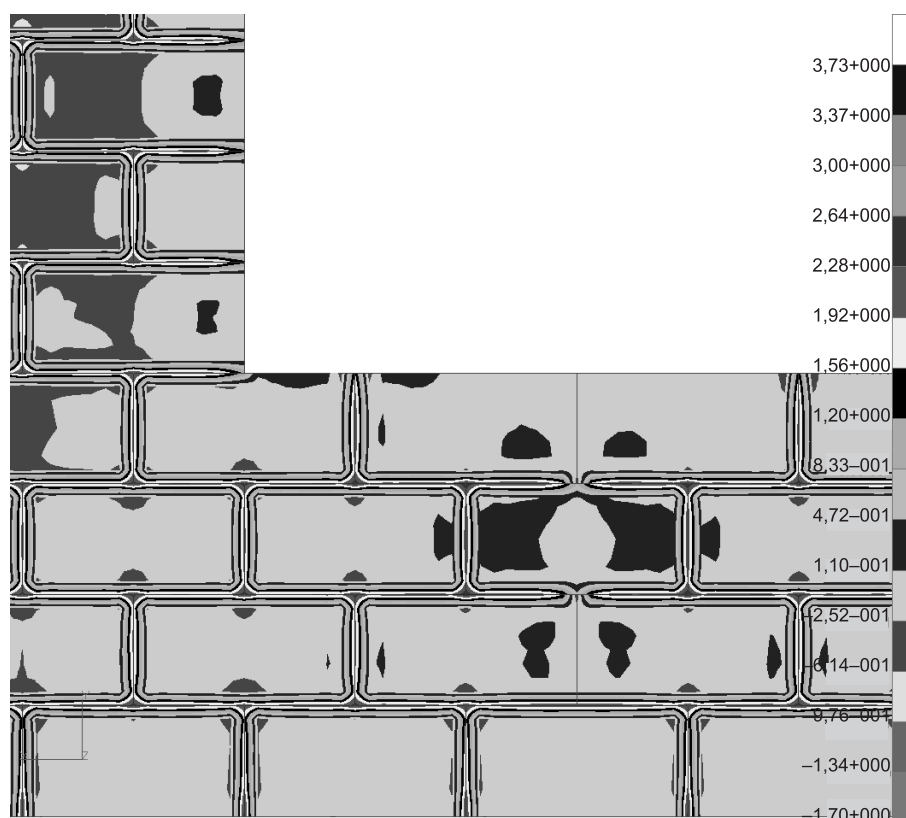


Рис. 7. Изополя горизонтальных напряжений во фрагменте из кладки с оконным проемом

Существующие нормы проектирования ограждающих и несущих конструкций из каменных, армокаменных и мелкоштучных блоков искусственного происхождения предусматривают их расчет только по прочности исходя из предельно допустимых напряжений в расчетном сечении. Основные эксплуатационные характеристики элементов, рассчитываемых по второй группе предельных состояний (трещиностойкость, деформативность), как правило, регламентируются конструктивными ограничениями и предполагаемыми «сверхзапасами» по прочности.

Изучение основных тенденций развития рынка строительных материалов позволяет сделать вывод о том, что темпы разработок материалов, аналогичных рассмотренным, достаточно высоки. Но применение этих материалов в строительстве сдерживается отсутствием методик, позволяющих эффективно и надежно проектировать здания. Долговечность конструкций рассматриваемого типа практически полностью характеризуется состоянием утеплителя из-за его ограниченной ремонтпригодности. При определенных условиях к таким конструкциям можно отнести несущие и самонесущие стены из простого кирпича, облицованные разнообразными системами вентилируемых фасадов. В таком случае основным становится расчет несущих и самонесущих ограждающих конструкций с учетом возможной деформативности элементов без использования конструктивных и искусственно назначенных предельных значений, не характеризующих реального напряженно-деформированного состояния конструкций. Ни один из «типовых прочностных» расчетов не учитывает деформации конструкций. Отсюда следует необходимость формирования новых подходов к типовым расчетам, а также дальнейших исследований по созданию адекватных методов оценки НДС и их экспериментальной апробации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Научно-технический отчет по теме «Исследование прочностных и деформативных свойств кладки из многослойных теплоэффективных блоков, изготовленных методом литья» [Текст]. — М. : ГУП ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2003.
2. СНиП II-22-81. Каменные и армокаменные конструкции [Текст]. — М. : ГУП ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2003. — 44 с.
3. Пособие по проектированию каменных и армокаменных конструкций [Текст]. — М. : ГУП ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1988.
4. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия / Госстрой России [Текст]. — М. : ГУП ЦПП, 2003. — 44 с.

АДИЩЕВ В.В., д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

КУРГУЗОВ В.Д., д-р физ.-мат. наук, проф.

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск

РООТ В.В., асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ПЛЯШКЕВИЧ С.А., млад. науч. сотр.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

САВЧЕНКО А.Ю., млад. науч. сотр.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 21.06.10

Adishchev V.V., doctor of technical sciences, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Kurguzov V.D., doctor of physical and mathematical sciences, professor, Lavrentev Institute of Hydrodynamics of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

Root V.V., post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Plyashkevich S.A., junior researcher, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Savchenko A.Yu., junior researcher, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

THE MULTI LAYERED HEAT EFFECTIVE BLOCKS IN MODERN BUILDING

The problem of the possibility of using multilayered heat effective blocks in modern construction is considered. The analysis of the experience of exploitation of structural elements was completed. Physical and mechanical characteristics of materials were determined. Mathematical modeling of different fragments of wall structures with application software and computing systems was completed.

Key words: heat effective block, glue mixture, carrying capacity, crack, shrinkage, kinematic effects, low-rise and high rise building, physical and mechanical properties.

REFERENCES

1. The Scientific and technical report on a theme «Investigation of the strength and deformation properties of multilayer thermal efficiency of masonry blocks, made by casting» [Text]. — М. : SUE TsNIISK. V.A. Kucherenko, 2003.
2. SN&R II-22-81. Stone and reinforced structures [Text]. — М. : SUE TsNIISK. V.A. Kucherenko, 2003. — 44 p.
3. Benefit design of stone and reinforced masonry structures [Text]. — М. : SUE TsNIISK. V.A. Kucherenko, 1988.
4. SN&R 2.01.07-85*. Loads and impact / Gosstroy of Russia [Text]. — М. : SUE LAC, 2003. — 44 p.

УДК 504.064

А.В. ГОРОДКОВ, Н.В. ВОЛКОВА

ИССЛЕДОВАНИЯ И ОЦЕНКА ВИЗУАЛЬНОЙ СРЕДЫ СРЕДНИХ И МАЛЫХ ГОРОДОВ

Проведен анализ и дана оценка визуальной среды малых и средних городов. Определена степень агрессивности отдельных элементов градостроительной среды с помощью коэффициента агрессивности. Приводятся результаты исследований видимой среды города Клинцы. Выявлена динамика восприятия визуальной городской среды.

Ключевые слова: видеоэкология, визуальная среда, городская среда, степень агрессивности, гомогенное поле, благоприятная видимая среда.

Среди современных общеизвестных проблем экологии городов — проблема изменения визуальной среды. Жители городов уже на подсознательном уровне ощущают дискомфорт от окружающей их однообразной среды («агрессивных» и гомогенных полей, унылого колористического решения фасадов зданий). Все это отрывает человека от природы и наносит ощутимый вред его здоровью, особенно с учетом синергетического эффекта с другими неблагоприятными факторами.

В.А. Филиным разработаны основы видеоэкологии, проделана большая работа по изучению взаимоотношений человека с тем, что видит его глаз. Исследования, проведенные специалистами Московского центра «Видеоэкология», показывают, что существует реальная угроза физиологическим механизмам зрения (автоматии саккад, бинокулярному аппарату, оп- и off-системам, аппарату аккомодации и т.п.), которые не могут полноценно работать в агрессивной и гомогенной средах. Это означает, что неблагоприятную визуальную среду с уверенностью можно отнести к факторам, отрицательно влияющим на здоровье жителей городов [1].

При кафедре инженерной экологии и природообустройства Брянской государственной инженерно-технологической академии в 2005 г. было открыто региональное представительство Московского центра «Видеоэкология», где проведены научные исследования визуальной среды г. Брянска и разработана методика оценки агрессивных и гомогенных зон. Ряд исследований был проведен и в г. Клинцы Брянской области.

Суть данного метода оценки заключается в том, что на плоскость исследуемого объекта, изображенного на фотографии, накладывается сетка и определяется коэффициент агрессивности, зависящий от общего количества ячеек сетки и числа ячеек, в которых более двух одинаковых видимых элементов. Эти параметры основываются на результатах исследований В.А. Филина, согласно которым при фиксации глазом в области ясного видения, равной 2° , более двух одинаковых объектов человек испытывает затруднения [1, 2]. Геометрические параметры исследуемых объектов (длина фасадов L_f , м, высота зданий H , м) и другие исходные данные, необходимые для проведения оценки агрессивности, получены в ходе натурных промеров лазерным дальномером Leica DISTOTMA5.

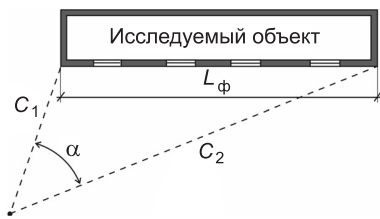


Рис. 1. Расчетная схема определения угла обзора объекта по горизонтали

Вертикальный и горизонтальный углы обзора α и β в градусах рассчитаны по формулам

$$\alpha = \arccos \frac{(C_{12} + C_{22} - L_{2\phi})}{2C_1 C_2}; \quad (1)$$

$$\beta = \arccos \frac{d^2 + L^2 - Hd}{\sqrt{(d^2 + L^2)[(H-d)^2 + L^2]}}. \quad (2)$$

Количество ячеек разбивочной сетки по горизонтали N_r и вертикали N_v определено по формулам

$$N_r = \alpha / \varphi; \quad (3)$$

$$N_v = \beta / \varphi. \quad (4)$$

Коэффициент агрессивности $K_{арр}$ рассчитан по формуле

$$K_{арр} = H_{п} / \Sigma_{н}, \quad (5)$$

где $H_{п}$ — количество ячеек, в которых более двух одинаковых видимых объектов;

$\Sigma_{н}$ — общее количество ячеек.

Разработанные нами графоаналитические методы оценки визуальной среды прошли успешную апробацию в рамках натурно-экспериментальных исследований в г. Брянске, а также других городах Брянской области, в частности в г. Клинцы [2].

Основная цель проводимых исследований — выявление и определение масштабов визуального загрязнения территории средних и малых городов с последующим выделением зон повышенной опасности, в пределах которых необходимо проведение мероприятий по снижению или полной нейтрализации влияния негативных видимых полей на человека.

Для ряда зданий, находящихся в градостроительных узлах планировочной структуры г. Клинцы, были определены коэффициенты агрессивности. Например, для фасада здания по просп. Ленина, 46, приведенного на рис. 2, коэффициент определен из трех видовых точек, исходные и расчетные данные занесены в табл. 1.

Архитектурно-художественный облик города, как и качество его среды, во многом зависит от площади озеленения территорий, находящихся в его пределах. Неоднократно отмечалось, что жители оценивают визуальный облик города более высоко, когда имеется достаточно озелененных территорий. Именно поэтому градостроительные нормы всегда предусматривали определенную площадь озеленения на одного жителя [1]. Исследования проводились в зимний и летний периоды времени года, соответственно коэффициенты агрессивности рассчитывались как без учета элементов озеленения, так и с ними. Так, для видовой точки 1 значение $K_{арр} = 0,22$, что свидетельствует о снижении агрессивности здания в сравнении



Рис. 2. Здание по просп. Ленина, 46, г. Клинцы
а — зима; б — лето

Таблица 1

Определение коэффициента агрессивности визуального поля фасада здания по просп. Ленина, 46 в г. Клинцы

№ ВИДОВОЙ ТОЧКИ	Исходные данные							Расчетные данные					
	C_1 , м	C_2 , м	$L_{ф,м}$	L , м	H , м	d , м	$\alpha^Г$, град.	$N_Г$	$\alpha^В$, град.	$N_В$	$H_П$	Σ_n	$K_{агр}$
1	33,8	43,9	32	33,47	15	1,13	47,2	24	24,4	12	119	288	0,41
2	44,2	36,2		35,7		-0,7	45,6	22	20,6	10	139	220	0,63
3	57	38,4		36,6		-1	32,3	16	20,2	10	142	160	0,88

Таблица 2

Определение коэффициента агрессивности визуального поля фасада здания по просп. Ленина, 46 в г. Клинцы с учетом зеленых насаждений

№ ВИДОВОЙ ТОЧКИ	Исходные данные							Расчетные данные					
	C_1 , м	C_2 , м	$L_{ф,м}$	L , м	H , м	d , м	$\alpha^Г$, град.	$N_Г$	$\alpha^В$, град.	$N_В$	$H_П$	Σ_n	$K_{агр}$
1	33,8	43,9	32	33,47	15	1,13	47,2	24	24,4	12	50	288	0,22
2	44,2	36,2		35,7		-0,7	45,6	22	20,6	10	61	220	0,27
3	57	38,4		36,6		-1	32,3	16	20,2	10	115	160	0,71

с безлиственным периодом оценки ($K_{агр} = 0,41$). Те же данные получены и для двух других точек фиксации, находящихся в бассейне видимости объекта, и представлены в табл. 2. Позитивная роль озелененных пространств в смягчении визуальной среды обуславливается экранированием участков фасадов, уменьшением площадей агрессивных поверхностей, улучшением колористики бассейна видимости. На рис. 2, б фасад здания, отмеченный фотофиксацией из первой видовой точки, закрыт листвой на 55 %, из второй точки — на 38 % и из третьей — на 30 % (для разных видовых точек это непостоянная величина). Очевидно, что при расположении зеленых насаждений должны быть учтены особенности маршрутов движения пешеходов. При этом следует добиваться максимального экранирования фасада для различных видовых точек обзора. Чтобы наглядно сравнить показатели, построена диаграмма (рис. 3).

В исследовании прослежена динамика восприятия визуальной городской среды. Был выбран участок центральной улицы, по которой ежедневно передвигается большое количество людей (ул. Октябрьская г. Клинцы), и рассмотрено влияние элементов городской среды. По заданному маршруту произведена фотофиксация объектов. Здания на улице расположены

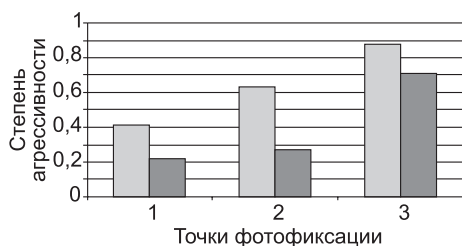


Рис. 3. Диаграмма, отражающая степень агрессивности здания по просп. Ленина, 46 (г. Клинцы) с учетом зеленых насаждений (■) и без них (□)

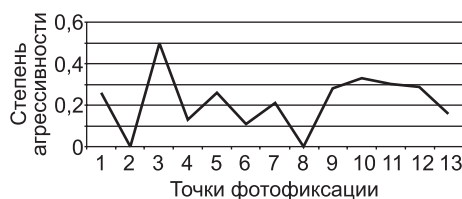


Рис. 4. График, отражающий динамику восприятия человеком окружающей среды ряда зданий по ул. Октябрьской, г. Клинцы

либо сразу друг за другом, либо между ними имеется оградительная часть или зеленые насаждения. Рассчитанный K_{agr} для элементов городской среды на данном участке варьируется в пределах от 0,12 до 0,5 — для архитектурных сооружений; зеленые насаждения, снижающие агрессивность среды, приравнивались к нулю. Установлено, что визуальная среда изменчива и при движении картина восприятия человеком видимых элементов среды меняется. Это отношение в виде графика представлено на рис. 4.

Для получения наиболее полной оценки состояния визуальной городской среды следует учитывать и субъективное мнение городского населения. Нами проведен анкетный опрос 800 человек, в результате которого получен комплекс сведений о видеоэкологической ситуации города. В частности, определены видимые элементы городской среды, на которые в первую очередь обращают внимание горожане. По результатам анкетирования получена эмоциональная оценка зданий, представляющих собой по видеоэкологическим параметрам агрессивные и неагрессивные видимые поля. Составлены перечни красивых и некрасивых улиц города, упоминаемых опрашиваемыми.

На основании имеющихся на данный момент результатов исследований (определения коэффициентов агрессивности, анкетного опроса, натурных обследований) составлена карта-схема зонирования территории города Клинцы по качеству визуальной среды. Схема демонстрирует масштабы и характер распределения загрязнения и предусматривает следующую классификацию территорий по качеству визуальной среды: благоприятная визуальная среда, формируемая многоэтажной и малоэтажной усадебной застройкой, эстетически непривлекательная видимая среда, неблагоприятная среда, а также зоны с высокой степенью загрязнения. Кроме того, на схеме показаны отдельные градостроительные объекты, улучшающие качество видимой среды и образующие агрессивные видимые поля.

Вторым объектом исследования явился бывший уездный город, а в настоящее время историческое сельское поселение Крапивна. Выполнен анализ визуальной среды достопримечательного места. На данный момент визуальную среду поселения нельзя назвать комфортной. Причина этого — в материальном оскудении и упадке города за советский период. Большое число архитектурных объектов обветшало и требует капитальной реконструкции, некоторые из них значительно утрачены. Но в целом визуальная среда Крапивны благоприятная, о чем свидетельствуют такие видеоэкологические параметры, как: большое количество памятников архитектуры, соразмерные масштабу человека высотные параметры застройки (не более четырех этажей), наличие архитектурного декора фасадов, сложность архитектурной и пространственной композиции, мощение улиц, играющие большую роль в городских панорамах зеленые насаждения.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Визуальная среда среднего города (на примере г. Клинцы) характеризуется достаточной вариабельностью. При исследовании городской застройки нами зафиксированы участки с агрессивной средой ($K_{\text{агр}} \approx 0,5$): промышленные и складские зоны (15 %), многоэтажная застройка (25 %); участки с нейтральной видимой средой ($K_{\text{агр}} \approx 0,25$): усадебная застройка и здания не выше трех этажей (60 %).

Зеленые насаждения должны быть «катализатором» эмоциональной разгрузки и одновременно «фильтром», через который человек будет воспринимать окружающую среду.

При исследовании динамики восприятия видимой среды наблюдалась изменчивость природного градостроительного окружения.

Визуальная среда малого города (на примере Крапивны) отличается наиболее благоприятными видеоэкологическими характеристиками и может служить примером комфортной визуальной среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Филин, В.А. Видеоэкология. Что для глаза хорошо, а что — плохо [Текст] / В.А. Филин. — М. : Видеоэкология, 2006. — 512 с.
2. Городков, А.В. Методика оценки агрессивности визуальных полей городской среды [Текст] / А.В. Городков, С.И. Федосова // Вест. МАНЭБ. — СПб. — 2006. — Т. 11, № 3. — С. 30–35.

ГОРОДКОВ А.В., д-р сельскохозяйств. наук, проф.; E-mail: avg@online.debryansk.ru

Брянская государственная инженерно-технологическая академия

ВОЛКОВА Н.В., асп.; E-mail: volkova32rus@mail.ru

Брянская государственная инженерно-технологическая академия

Получено 09.06.10

Gorodkov A.V., doctor of agricultural sciences, professor, Bryansk State Engineering-technological Academy, Russia

Volkova N.V., post-graduate student, Bryansk State Engineering-technological Academy, Russia

RESEARCH AND EVALUATION OF THE VISUAL ENVIRONMENT OF SMALL TOWNS

The analysis and assessed the visual environment of small and medium-sized cities. The degree of aggressiveness of individual elements of the urban environment, using the coefficient of aggressiveness. The results of studies have among the city Klincy. The dynamics of visual perception of urban environment. A schematic map, the zoning Klincy as a visual medium. Dan analytical assessment of the visual environment, historic rural settlement Кропывна, to sample the visual environment comfortable.

Key words: video ecology, visual environment, urban environment, the degree of aggressiveness, homogeneous field, enabling visible among.

REFERENCES

1. Filin, V.A. Video ecology. What the eye is good and what — bad [Text] / V.A. Filin. — M. : Video ecology, 2006. — 512 p.
2. Gorodkov, A.V. Methods of assessing the aggressiveness of the visual field of the urban environment [Text] / A.V. Gorodkov, S.I. Fedosova // Bulletin MANEB. — St. Petersburg, 2006. — Vol. 11, N 3. — P. 30–35.

УДК 624.045

Т.Л. ДМИТРИЕВА

ОПТИМИЗАЦИЯ ФЕРМ С ДИСКРЕТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Рассмотрены особенности решения задач оптимального проектирования ферм с дискретно меняющимися параметрами сечений, значения которых приняты в соответствии со стандартами. Дано сравнение результатов оптимизации ферм различных сечений.

Ключевые слова: автоматизированное проектирование, оптимальное проектирование, металлические конструкции, ферма, дискретная оптимизация.

При решении прикладных задач оптимизации достаточно часто возникает вопрос о дискретном изменении варьируемых параметров. При проектировании металлических конструкций такая постановка особенно актуальна, так как в большинстве случаев сечения элементов принимаются в соответствии с сортаментами. Рассмотрим задачу оптимизации фермы с дискретными параметрами сечений, используя при этом алгоритм, приведенный в [1, 2], где задача оптимизации решалась в форме задачи нелинейного математического программирования, а функция цели представляла объем конструкции.

$$f(x) = \sum_{i=1}^S A_i L_i. \quad (1)$$

Здесь S — число элементов фермы;

A_i, L_i — площадь и длина i -го элемента фермы;

$x_j, j = 1, 2, \dots; n$ — варьируемые параметры.

В качестве примера рассмотрим задачу оптимизации статически определимой фермы в двух случаях загрузки (рис. 1).

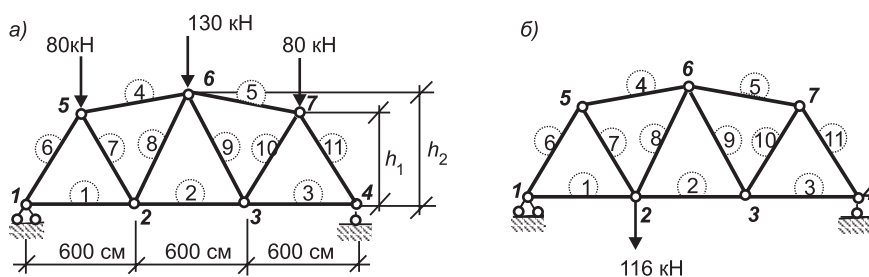


Рис. 1. Ферма с полигональным верхним поясом
первый (а) и второй (б) случаи загрузки

Будем варьировать вертикальные координаты узлов 5–7, меняя таким образом очертание верхнего пояса фермы. Для сохранения симметрии координаты узлов 5 и 7 назовем равными. Установим следующие пределы изменения высот h_1 и h_2 : $h_{1 \min} = h_{2 \min} = 100$ см, $h_{1 \max} = h_{2 \max} = 600$ см.

Зададим ограничения по прочности и устойчивости в элементах фермы и ограничение на перемещение узла 2. Таким образом, j -й элемент вектора ограничений может представлять собой:

© Дмитриева Т.Л., 2010

— проверку на прочность в i -м растянутом элементе фермы

$$g_j = \frac{N_i}{R_y A_i} - 1 \leq 0; \quad (2)$$

— проверку на устойчивость в i -м сжатом элементе

$$g_j = \frac{N_i}{R_y A_i \varphi_i} - 1 \leq 0, \quad (3)$$

где коэффициент φ_i определялся по формулам раздела (5.3) СНиП II-23-81* «Стальные конструкции»; N_i — значение продольной силы в i -м элементе;

— ограничение на перемещение узла 2

$$g_j = \frac{\Delta_2}{\Delta_{\text{доп}}} - 1 \leq 0. \quad (4)$$

Были приняты следующие номера ограничительных функций:

$j = 1, 3, 5 \dots 21$ — ограничения на прочность и устойчивость при загрузке 1;

$j = 2, 4, 6 \dots 22$ — ограничения на прочность и устойчивость при загрузке 2;

$j = 23, 24$ — ограничения на перемещения узла 2 при загрузках 1 и 2.

Параметры материала: $E = 2,1 \cdot 10^8$ кПа, $R_y = 2,3 \cdot 10^5$ кПа. Предельное значение перемещения узла 2 $\Delta_{\text{доп}} = 1,2$ см.

Приведем примеры оптимального проектирования ферм с различными типами поперечных сечений (рис. 2).

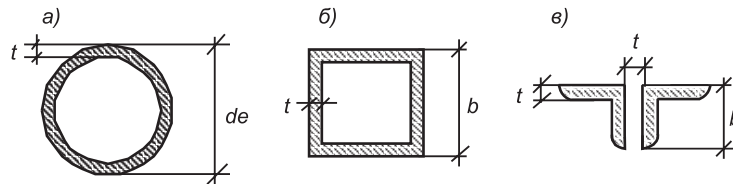


Рис. 2. Типы поперечных сечений элементов ферм
 а — кольцевое сечение; б — коробчатое сечение; в — сечение из двух уголков

Пример 1. Сечения элементов фермы представляют собой кольцо, параметры которого взяты из сортамента электросварных труб по ГОСТ 10704-91 (рис. 2, а).

При одном значении диаметра de здесь предлагается несколько значений толщин. Это приводит к тому, что площади сечений по мере возрастания параметров сортамента меняются скачкообразно. На рис. 3, а показан график изменения площадей при возрастании первых четырех значений диаметров de и всех соответствующих им значений толщин t .

Для устойчивой работы алгоритма оптимизации были учтены только те значения толщин, которые обеспечивали монотонное возрастание площадей. На рис. 3, б показан график изменения площадей при возрастании первых четырех значений диаметров с учетом выборочных значений толщин. Отметим, что функции ограничений при этом могут иметь менее сглаженный характер. Это связано с тем, что для сжатых элементов эти функции зависят от моментов инерции J , характер изменения которых на

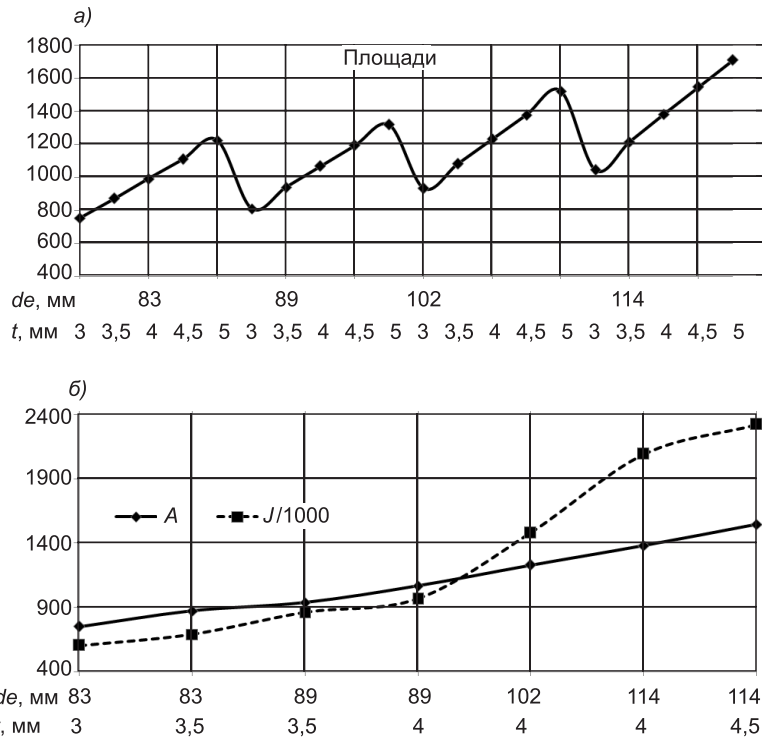


Рис. 3. Изменение площадей с увеличением параметров сортамента (а), площадей A и моментов инерции J при возрастании выборочных параметров сортамента (б)

интервале возрастания принятых параметров сортамента показан на рис. 3, б пунктиром. Всего, таким образом, принято 24 сочетания диаметр — толщина, которые занесены в двумерный массив *sort* (табл. 1). Первая строка массива включала значения диаметров, вторая — соответствующих толщин. Для каждого элемента фермы варьировались порядковые номера принятых значений $de-t$, что соответствовало номеру столбца массива *sort*. Таким образом, переменные x_1-x_{11} варьировались в целочисленном диапазоне от 1 до 24. Переменная x_{12} представляла собой высоты узлов 5 и 7 (h_1), x_{13} — высоту узла 6 (h_2). Эти параметры менялись дискретно от 100 до 600 см с шагом 100 см. Всего варьировались 13 параметров и были приняты 24 ограничения.

Задача на условный экстремум (1)–(4) была приведена к задаче безусловной минимизации методами модифицированных функций Лагранжа [1, 2]. В качестве метода безусловной минимизации на первой итерации использован метод деформированного многогранника, где полученные результаты округлялись до заданных дискретных значений. На последую-

Таблица 1
Значения диаметров и толщин, принятых для массива *sort* в примере 1, см

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
de	8,3	8,3	8,9	8,9	10,2	11,4	11,4	12,7	12,7	14	15,2	15,2
t	0,3	0,35	0,35	0,4	0,4	0,4	0,45	0,45	0,5	0,5	0,5	0,55
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
de	15,9	16,8	20,3	20,3	21,9	27,3	27,3	32,5	32,5	42,6	42,6	42,6
t	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,8	0,7	0,8	0,9

ших итерациях использован метод покоординатного спуска, где спуск по каждой координате выполнялся при фиксированных значениях других переменных. Полученное значение также округлялось до дискретного. Двойственные переменные пересчитывались по выражениям, которые обеспечивали линейную скорость сходимости.

В табл. 2, 3 приведены результаты расчета. Так же, как в [2], задача решалась при различных начальных значениях вектора X . Получено 7 решений, где начальные значения de_0, t_0 для элементов фермы соответствовали нечетным столбцам массива $sort$ с первого по 13-й. Во всех решениях начальное значение высот h_1 и h_2 принималось 100 см. В табл. 2, 3 приняты следующие обозначения: d_{opt} и t_{opt} — оптимальные значения внешнего диаметра и толщины, $Niter$ — число итераций, $NfunFx$ — число обращений к целевой функции, F_{opt} — оптимальный объем фермы, g_{act} — невязка в потенциально активном ограничении.

Таблица 2

Оптимальные результаты в примере 1

№ решения	de_0/t_0 , см	F_{opt} , см ³	$NfunFx$	$Niter$	h_1/h_2 , см	$g_{act} (max)$
1	8,3/0,3	84926,631	1967	9	300/500	$g_{23} = -0,837 \cdot 10^{-3}$
2	8,9/0,35	81708,870	2091	9	300/500	$g_{23} = -0,318 \cdot 10^{-3}$
3	10,2/0,4	81575,969	1989	9	400/500	$g_{23} = -0,252 \cdot 10^{-2}$
4	11,4/0,45	81708,870	4684	30	300/500	$g_{23} = -0,318 \cdot 10^{-3}$
5	12,7/0,5	81708,870	3191	18	300/500	$g_{23} = -0,318 \cdot 10^{-3}$
6	15,2/0,5	82796,631	5035	30	300/500	—
7	15,9/0,6	81708,870	2420	16	300/500	$g_{23} = -0,318 \cdot 10^{-3}$

Таблица 3

Оптимальные параметры сечений d_{opt} и t_{opt} в примере 1, см

№ решения		Элементы фермы										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	d_{opt}	15,2	10,2	8,9	14,0	14,0	12,7	8,3	8,3	8,3	8,3	12,7
	t_{opt}	0,55	0,4	0,35	0,5	0,5	0,45	0,3	0,3	0,3	0,3	0,45
2, 4, 5	d_{opt}	11,4	11,4	8,9	14,0	14,0	12,7	8,3	8,3	8,3	8,3	12,7
	t_{opt}	0,45	0,45	0,35	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,45
3	d_{opt}	8,9	10,2	8,3	12,7	12,7	12,7	8,3	10,2	10,2	8,3	12,7
	t_{opt}	0,4	0,4	0,35	0,5	0,5	0,45	0,3	0,4	0,4	0,3	0,45
6	d_{opt}	11,4	12,7	8,9	14,0	14,0	12,7	8,3	8,3	8,3	8,3	12,7
	t_{opt}	0,45	0,45	0,4	0,5	0,5	0,45	0,3	0,3	0,3	0,3	0,45

В результате расчетов было получено несколько комбинаций оптимальных параметров сечений, дающих близкие значения целевой функции (разброс около 4 %), из которых можно выделить 4 локальных оптимума. В большинстве случаев получены оптимальные высоты $h_1 = 300$ см, $h_2 = 500$ см и только в одном $h_1 = 400$ см, $h_2 = 500$ см.

На рис. 4, а показаны графики сходимости целевых функций при различных начальных спусках. Этот же график в более крупном масштабе показан на рис. 4, б. Номера функций на этих рисунках соответствуют

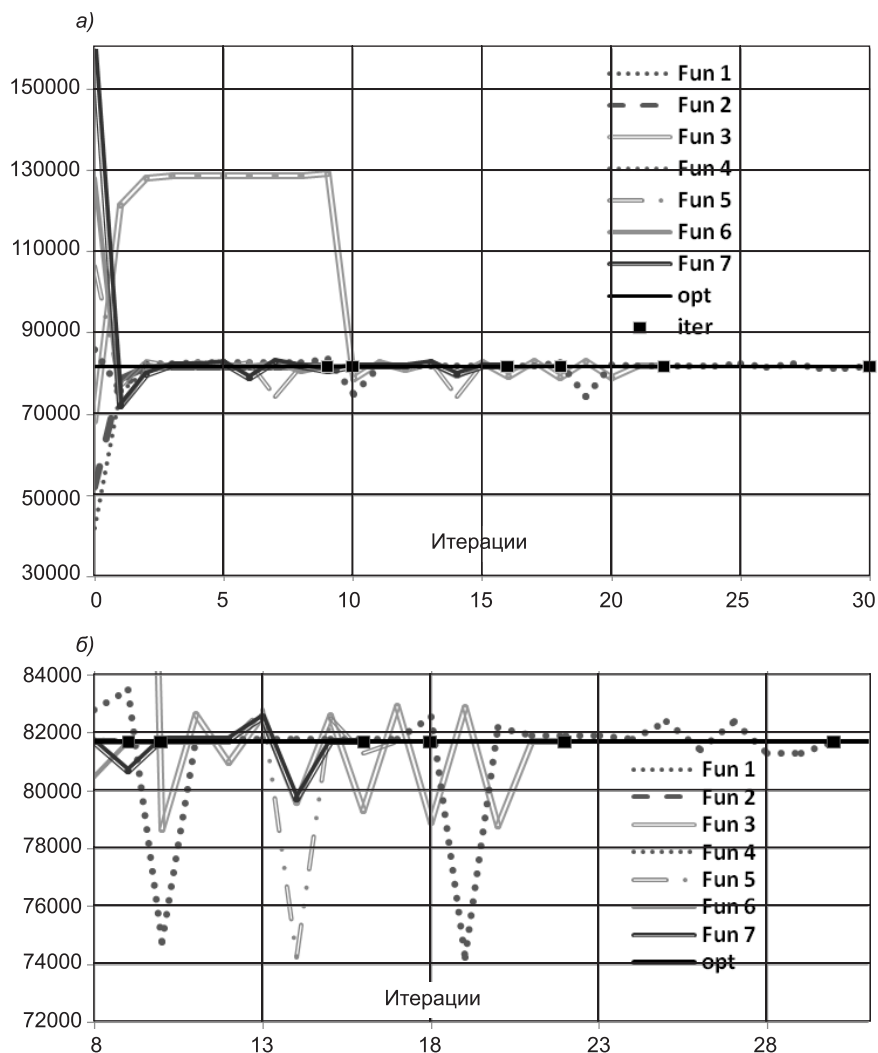


Рис. 4. Изменение целевой функции на итерациях

номеру решения. Например, график изменения целевой функции для решения 1 обозначен Fun 1.

Пример 2. Сечения элементов фермы приняты в виде равностороннего короба, параметры которого взяты из «Сортамента гнутых замкнутых профилей квадратного сечения по ТУ 36-2287–80» (см. рис. 2, б).

Массив *sort* (табл. 4) включал: внешнюю высоту сечения b (см), толщину t (см), площади сечений A (см²) и моменты инерции J (см⁴). Принятые параметры сечений обеспечивали монотонное возрастание площадей и моментов инерции, хотя функция J имела существенные изломы в узловых точках, что, безусловно, отразилось на сходимости алгоритма.

Таблица 4

Массив *sort* в примере 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
b	8	8	10	10	12	12	14	14	16	18	18
t	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8
A	9,24	12,16	15,36	19,0	23	27,36	32,16	37,24	42,84	48,44	55,04
J	91,4	117,3	236,3	286,5	507,9	594,2	964,3	1100,9	1674,9	1878,1	2719,7

Таблица 5

Оптимальные результаты в примере 2

№ решения	$Niter$	g_{act}	N_{funF_x} , см ³
1	30	—	4259
2	8	—	1722
3	30	$g_{23} = -0,71395 \cdot 10^{-2}$	4478
4	19	$g_{23} = -0,71395 \cdot 10^{-2}$	2798
5	26	$g_{23} = -0,215593 \cdot 10^{-3}$	2798
6	27	$g_{23} = -0,271984 \cdot 10^{-2}$	3799

В табл. 5, 6 приведены результаты шести решений задачи, полученные при разных начальных значениях b_0 , t_0 (использовались 1, 3, 5, 7, 9, 11-й столбцы массива *sort*). Здесь имело место несколько близких локальных оптимумов, которые различались по значению целевой функции в пределах 0,264 %.

Таблица 6

Оптимальные параметры сечений d_{opt} и t_{opt} в примере 1, см

№ решения		Элементы фермы											F_{opt} , см ³	h_1, h_2 , см
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
1	b_{opt}	8	8	8	12	12	10	8	8	8	8	10	87353	300 600
	t_{opt}	0,4	0,4	0,3	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5		
3 9	b_{opt}	8	8	8	12	12	12	8	8	8	8	10	87514	300 500
	t_{opt}	0,4	0,4	0,3	0,5	0,5	0,6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5		
5 7	b_{opt}	8	8	8	12	12	12	8	8	8	8	10	87416	300 500
	t_{opt}	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5		
11	b_{opt}	8	10	8	12	12	10	8	8	8	8	12	87584	300 500
	t_{opt}	0,4	0,4	0,3	0,5	0,5	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5		

Пример 3. Сечения элементов фермы представляют собой два равносторонних уголка, соединенных планкой той же толщины, что и стенка уголка (см. рис. 2, в).

Дискретные параметры сечения t (см) и b (см) взяты из «Сортамента горячекатаных равнополочных уголков по ГОСТ 8509–93». По этим параметрам были вычислены площади A и моменты инерции J сечений.

Из множества решений этой задачи при разных начальных значениях b_0 и t_0 выявлено 6 локальных оптимумов. Среди них можно выделить две группы. В *первой группе* активно ограничение на перемещение узла 2 (g_{23}). Оптимальные высоты узлов: $h_1 = 300$ см, $h_2 = 500$ см. Оптимальный объем менялся в пределах от 88 574,5 до 89 666,5 см³. Во *второй группе* активными были ограничения g_7 , g_9 , g_{23} , оптимальные высоты $h_1 = 300$ см, $h_2 = 400$ см. Оптимальный объем менялся в пределах от 100 053 до 100 915 см³.

При сравнении результатов из множества полученных решений в каждом примере были выбраны наиболее экономичные по объему, но имеющие более высокую точность в невязках ограничений (табл. 7).

Выводы. Дискретные изменения параметров сечений привели к увеличению объема фермы по сравнению с фермами, где параметры сечений менялись непрерывно [2]. Частично это можно отнести к тому, что нижний предел изменения диаметров кольца de и высоты короба b в примерах 1 и 2 взят выше, чем в [2].

Таблица 7

Результаты оптимизации

Параметр	Пример 1 ○	Пример 2 □	Пример 3 ∟
Объем, см ³	81708,871	87352,934	89252,873
h , см	300	—300	300
h_2 , см	500	600	500

Выполнено исследование сходимости в задачах дискретной оптимизации. Вследствие того, что параметры сечений на итерациях меняются скачкообразно, целевая и ограничительные функции также менялись скачкообразно даже на последних итерациях. Это потребовало большего количества итераций для получения оптимального решения.

Следующая особенность решения задач оптимизации проектирования ферм с дискретно меняющимися параметрами заключалась в том, что здесь имели место локальные оптимумы. Это могли быть достаточно близкие по значению целевой функции оптимальные решения, где очертания верхнего пояса фермы были одинаковыми, активные ограничения — одни и те же. В других случаях локальные оптимумы существенно отличались параметрами сечения, высотой узлов и числом активных ограничений. Проектировщик в таких случаях имеет возможность выбора наиболее приемлемого оптимального решения.

В рассмотренных примерах показаны три варианта ферм с различными типами поперечных сечений. Однако аналогичным образом могут быть запроектированы фермы с другими простыми и составными сечениями, параметры которых меняются дискретно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Безделев, В.В. Использование многометодной стратегии оптимизации в проектировании строительных конструкций [Текст] / В.В. Безделев, Т.Л. Дмитриева // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 2. — С. 90–95.
2. Дмитриева, Т.Л. Алгоритм автоматизированного проектирования ферм минимального веса [Текст] / Т.Л. Дмитриева // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 3. — С. 98–105.

*ДМИТРИЕВА Т.Л., канд. техн. наук, доц.
Иркутский государственный технический университет*

Получено 12.05.10

Dmitrieva T.L., candidate of technical sciences, assistant professor, Irkutsk State Technical University, Russia

TRUSSES OPTIMIZATION WITH DISCRETE PARAMETERS

The particularities of the optimal design problems for trusses with discrete changing sections parameters, which are accepted in accordance with standards, are covered. Comparison with trusses optimization results of the different sections is given.

Key words: computer aided design, optimum designing, metallic construction, truss, discrete optimizations.

REFERENCES

1. Bezdelev, V.V. Use the multi-method strategy to optimization in Building constructions designing [Text] / V.V. Bezdelev, T.L. Dmitrieva // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 2. — P. 90–95.
2. Dmitrieva, T.L. Computer aided algorithm for designing truss of the minimum weight [Text] / T.L. Dmitrieva // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 3. — P. 98–105.

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ¹

1. К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:
— *сопроводительное письмо* руководства организации, откуда исходит рукопись;

к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи² за подписью автора или руководителя представляющей статью организации. Плата за публикацию статей аспирантов не взимается. Гарантийное письмо не требуется, если статья представляется организацией, осуществляющей целевые взносы на издание нашего журнала;

— *рекомендацию* соответствующей кафедры вуза (заверенную выписку из протокола заседания кафедры);

— *экспертное заключение* о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись;

— *разрешение* Роспатента на открытую публикацию материалов по заявке на изобретение.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере в программе Microsoft Word и представляться в редакцию распечатанной в двух экземплярах, с приложением ее записи на CD (3", 5") или дискете 3,5". Текст рукописи набирают шрифтом Times New Roman Суг размером 14 пт. с межстрочным интервалом 1,5. Объем рукописи — до 10 страниц. Обязательна нумерация страниц.

3. Порядок оформления статьи (см. макет статьи на Internet-сайте журнала):

— индекс УДК;

— инициалы, фамилии авторов;

— название статьи;

— аннотация (объемом до 0,3 страницы текста);

— ключевые слова;

— текст статьи;

— библиографический список не более четырех ссылок (при большем количестве их следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5–2008);

— сведения об авторах: *фамилии, инициалы, ученые степени, звания* (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и *английском языке*;

— почтовые адреса, телефоны и *e-mail авторов*;

— *название статьи на английском языке*;

— *аннотацию на английском языке*;

— *ключевые слова на английском языке*;

— *библиографический список на английском языке*.

4. На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

5. Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением *.cdr (предпочтительно) или *.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. Иллюстрации, в том числе фотографии, должны быть черно-белыми с хорошей проработкой деталей.

Рисунки должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (внести изменения, исправления, т.е. изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки).

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, с подписями к ним. Размер иллюстрации не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

6. Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

7. Формулы следует набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набирать курсивом. Во избежание смещения сходных изображений прописных и строчных букв (*V и v, S и s, O и o, K и k* и др., а также трудноразличимых букв и символов: *l, e и 1* (цифра), *n и п, I и J* и т.п.) пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).

¹ С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

² На 2010 г. — из расчета 650 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

8. Следует применять физические величины и их обозначения, соответствующие стандарту СТ. СЭВ 1052–78 (СН 528–80).

9. В библиографический список включаются только те работы, которые опубликованы в печати, составленные в соответствии с ГОСТ 7.80–2000, ГОСТ 7.1–03.

Примеры оформления можно найти на Internet-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу www.sibstrin.ru

10. Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции. Материалы уже публиковавшихся работ к рассмотрению не принимаются.

11. Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указываются ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка «рукопись после доработки». Доработанную статью необходимо присылать в двух экземплярах с приложением ее записи в *электронном виде*. К доработанной рукописи обязательно прикладывать ответы на все замечания рецензента. Датой поступления статьи считается получение редакцией ее окончательного текста.

12. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются. Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста рукописей. *Корректур статей авторам не представляется.*

13. *Гонорар за опубликованные статьи не выплачивается.*

14. **Рукописи, не удовлетворяющие изложенным требованиям, отправляются авторам на доработку, что замедляет срок их опубликования.**

ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА

на 2-е полугодие 2010 г.

НА НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗВЕСТИЯ

ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

«СТРОИТЕЛЬСТВО»

Журнал имеет разделы

Строительные конструкции
Теория инженерных сооружений
Строительные материалы и изделия
Экономика и организация строительства
Автоматизация и технология строительного производства
Гидротехническое строительство
Санитарная техника

Строительство автомобильных дорог и мостов
Строительные и дорожные машины
Научные проблемы архитектуры и экологии
Научно-методический В лабораториях вузов
Внедрение научных достижений в производство
Научная информация

Каталожная цена за 6 месяцев — 1080 р.

Цена отдельного номера — 180 р.

Подписка принимается с любого месяца без ограничения всеми агентствами
Роспечати и отделениями связи. Индекс 70377.

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 8 (620) 2010

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Т.П. Петроченко*

Технический редактор *Н.М. Макаренко*

Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*

Корректор *Г.И. Шведкина*