

ВЕСТНИК

ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО № 25 (125)
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА 2008

ISSN 1991-9743

СЕРИЯ

«СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА»

Выпуск 7

ПОСВЯЩАЕТСЯ
65- ЛЕТИЮ ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Учредитель – ГОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет»

Редакционная коллегия серии:

д.т.н, профессор В.М. Асташкин

(*отв. редактор*);

Т.А. Кравченко (*отв. секретарь*);

д.т.н, профессор С.Г. Головнев;

д.т.н. С.Е. Денисов;

к.т.н., доцент Ю.Ф. Кутин;

к.т.н., профессор Ю.В. Максимов;

д.т.н, профессор В.И. Панферов;

д.т.н., профессор А.Н. Потапов;

к.т.н., профессор В.В. Спасибожко;

д.т.н., профессор Б.Я. Трофимов.

Серия основана в 2001 году.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-26455
выдано 13 декабря 2006 г. Федеральной службой по
надзору законодательства в сфере массовых комму-
никаций и охране культурного наследия.

Журнал включен в Реферативный журнал и Базы
данных ВИНТИ. Сведения о журнале ежегодно
публикуются в международной справочной системе
по периодическим и продолжающимся изданиям
«Ulrich's Periodicals Directory».

Решением Высшей аттестационной комиссии
Министерства образования и науки Российской Фе-
дерации журнал включен в «Перечень ведущих ре-
цензируемых научных журналов и изданий, в кото-
рых должны быть опубликованы основные научные
результаты диссертации на соискание ученой степени
доктора и кандидата наук».

Подписной индекс Вестника ЮУрГУ, серия
«Строительство и архитектура» 29563, объединенный
каталог «Пресса России».

Периодичность выхода – 2 номера в год.

СОДЕРЖАНИЕ

Теория расчета строительных конструкций

МЕЛЬЧАКОВ А.П., БЕЗЗУБКОВА Г.А., КОСОГОРОВ В.Г., ЧЕБОКСАРОВ Д.В. О правилах по регулированию риска аварии зданий и сооружений на стадиях возведе- ния и эксплуатации	4
--	---

Строительные материалы, изделия и конструкции

КОРОЛЕВ А.С. Применение физической модели сферолитно-решеточной структуры при прогнозировании прочности цементного камня и бетона	9
ХАКИМОВА Э.Ш. Цементные бетоны с нанодобавками синтетического цеолита	16
ГАМАЛИЙ Е.А. Горелые породы как активная минеральная добавка в бетон	22
СЕНИЦЫН Д.Е. Цементы с использованием шлаков окисленных никелевых руд ОАО «Уфалейникель» в качестве активной минеральной добавки	28
КОРОЛЕВ А.С. О новом подходе в математическом прогнозировании водонепроницае- мости цементных композитов	31
АБЫЗОВ В.А. Выбор рациональных областей применения промышленных отходов в технологии жаростойкого бетона	37

Инженерное оборудование зданий и сооружений

ПАНФЕРОВ В.И., ФЕВРАЛЁВ А.А. Численное моделирование переходных процессов в газопроводах	40
ДЕНИСЕНКО Ю.Н. К вопросу оптимизации процессов плановой корректировки регулиро- вания отпуска теплоты по данным контроля теплового режима систем потребителей	45

Научно-методический раздел

ХЕЙФЕЦ А.Л., ЛОГИНОВСКИЙ А.Н. 3D-модели линейчатых поверхностей с тремя прямолинейными направляющими	51
---	----

CONTENTS

Theory of structural analysis

MELCHAKOV A.P., BEZZUBKOVA G.A., KOSOGOROV V.G., CHEBOKSAROV D.V. About the regulating rules of risk of buildings and constructions crash on the stage of erection and operation	4
--	---

Building and constructional materials and items

KOROLEV A.S. Application of physical model of spherulitic-lattice structure while forecast- ing the strength of cement stone and concrete	9
KHAKIMOVA E.S. Cement concrete with nanoadmixture of synthetic zeolite	16
GAMALIY E.A. Burnt rocks as an active mineral admixture to concrete	22
SYNYTSYN D.E. Cements with usage of slags of oxidized nickel ores of OAO "Ufaleynikel" as an active mineral admixture	28
KOROLEV A.S. About the new approach in mathematical prognostication of water imperme- ability of cement composites	31
ABYZOV V.A. Choice of rational application domains of industrial waste in the refract con- crete technology	37

Plumbing and heating installations of buildings and constructions

PANFEROV V.I., FEVRALEV A.A. Numerical simulation of the transitional processes in the gas pipelines	40
DENISENKO Y.N. About processes optimization of the scheduled correction of the heat supply regulation according to the data of control of consumers systems' thermal conditions	45

Methodological section

KHEYFETS A.L., LOGINOVSKY A.N. 3D-models of ruled surfaces with three rectilinear guides	51
---	----

Теория расчета строительных конструкций

УДК 69.05(07)

О ПРАВИЛАХ ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ РИСКА АВАРИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА СТАДИЯХ ВОЗВЕДЕНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ

А.П. Мельчаков, Г.А. Беззубкова, В.Г. Косогоров, Д.В. Чебоксаров

ABOUT THE REGULATING RULES OF RISK OF BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS CRASH ON THE STAGE OF ERECTION AND OPERATION

A.P. Melchakov, G.A. Bezzubkova, V.G. Kosogorov, D.V. Cheboksarov

Изложены основные положения свода правил, предназначенного для снижения негативного влияния человеческого фактора на уровень конструкционной безопасности зданий и сооружений. В основу свода правил положен стандарт на величину риска аварии. Для регулирования риска аварии строительного объекта задействованы процедуры сертификации и страхования.

Ключевые слова: строительный объект, безопасность, риск аварии, ошибки людей, надежность, экспертная система, страховой полис, сертификат соответствия.

The article gives the fundamentals of the code of rules providing the reduction of negative influence of human factor upon level of structural safety of buildings and constructions. The code of rules is based on the standard of the risk of crash rate. In order to regulate the risk of crash of the development the procedures of certification and insurance are applied.

Keywords: development, safety, risk of crash, human errors, reliability, expert system, insurance policy, certificate of conformity.

При проектировании зданий и сооружений строительные нормы и правила за счет так называемых коэффициентов надежности компенсируют целый ряд опасных воздействий на объект. Не компенсированным остается человеческий фактор риска, связанный с организационными и техническими ошибками людей и который по статистике является доминирующей причиной аварийных обрушений несущих конструкций строительных объектов. Для снижения негативного влияния этого фактора на уровень конструкционной безопасности зданий и сооружений в дополнение к существующим строительным нормам разработан свод правил, позволяющий регулировать величину риска аварии объекта на стадиях его возведения и эксплуатации.

В основу свода правил положены следующие научные положения:

1. Абсолютно безопасных зданий и сооружений не существует. Уже на стадии проектирования в них в соответствии с действующими нормами и по умолчанию закладывается так называемая теоретическая вероятность аварии. Фактическая же

вероятность аварии построенного объекта всегда выше теоретической вероятности, поскольку полное исключение ошибок (дефектов) при реализации инвестиционных строительных проектов невозможно.

2. Отношение фактической и теоретической вероятностей может служить показателем уровня конструкционной безопасности строительного объекта, т. е. исполнять роль риска аварии, так как от величины этого отношения существенным образом зависит не только возможность появления негативного события под названием «авария», но и размер ущерба в случае реализации этого события.

3. В правильно запроектированном и построенном объекте величина риска аварии после завершения строительно-монтажных работ не должна превышать величины естественного (нормального) риска аварии на неограниченном множестве новых зданий и сооружений.

4. Существуют так называемые пороговые инвариантные значения риска аварии, при достижении которых строительный объект независимо от его конструктивного типа и этажности переходит

дит в качественно иное техническое состояние: из безопасного в аварийное, а из аварийного состояния в ветхо-аварийное.

Нормативной базой свода правил является стандарт на величину риска аварии строительных объектов, сформированный с учетом пороговых инвариантных значений риска [1]. Стандарт используется в механизмах регулирования риска аварии. Регулирование производится в том случае, если в результате исследования доказано, что строящийся или эксплуатируемый объект не соответствует требованиям стандарта. К механизмам регулирования относятся процедура сертификации соответствия требованиям стандарта и страхование объектов строительства на случай их аварии. Сертификационным испытаниям могут подвергаться не только строящиеся, но и подержанные здания и сооружения. При сертификационных испытаниях строящегося здания оценивается потенциальный риск аварии, формируемый за счет грубых отступлений параметров несущих конструкций объекта от требований проекта.

В процедуре сертификации строительного объекта важное место занимают функции экспертов, задача которых состоит в подготовке исходной информации для расчета фактического риска аварии исследуемого объекта. К такой информации предъявляются особые требования. Она должна быть представлена в формализованном виде, позволяющем осуществлять виртуальные испытания риска аварии на основе компьютерного моделирования аварийных ситуаций исследуемого объекта. Для строящихся зданий и сооружений методы диагностирования должны обеспечить не только достоверность информации, но и оперативность ее получения с целью своевременного реагирования на негативные последствия такой информации. Для уже построенных строительных объектов технология диагностики может быть основана на неразрушающих и/или косвенных методах выявления скрытых дефектов. К таким методам можно отнести, например, динамический метод, основанный на определении частоты собственных колебаний несущего каркаса здания с последующим сравнением его с проектной частотой.

В своде правил использованы следующие понятия и определения:

Безопасность конструкционная – базовый вид безопасности строительного объекта, характеризующий степень его защищенности от аварии. Зависит от технического состояния конструкций несущего каркаса здания (сооружения). Трактуются как отсутствие недопустимого риска аварии и считается достаточной, если риск аварии объекта не превышает значения, при котором объект переходит в аварийное состояние.

Риск аварии – мера угрозы аварийного обрушения здания (сооружения) и мера ожидаемого ущерба в случае, если авария строительного объ-

екта произойдет. Представляется в виде случайного коэффициента превышения теоретической вероятности аварии, заложенной в строительные нормы и вносимой по умолчанию в объект при его проектировании.

Нормальный риск аварии – инвариантное значение максимально допустимого риска аварии для законченных строительством зданий и сооружений.

Критический риск аварии – инвариантное значение риска аварии, при превышении которого техническое состояние находящегося в эксплуатации строительного объекта характеризуется как аварийное.

Безопасный ресурс – интервал времени эксплуатации строительного объекта от текущего момента времени до момента достижения им критического значения риска аварии.

Надежность несущей конструкции – степень соответствия несущей конструкции требованиям проекта в части обеспечения ее прочности, жесткости и устойчивости.

Дефект несущей конструкции – отступление параметров конструкции от требований проекта, приводящее к повышению риска аварии объекта.

Сертификат соответствия – документ, подтверждающий соответствие строительного объекта требованию стандарта на величину риска аварии.

Страховой полис – документ, подтверждающий, что объект застрахован на случай аварийного обрушения.

Стандарт на величину риска аварии – это совокупность нормального и критического значений риска аварии. К зданиям и сооружениям он предъявляют следующие требования [1]:

– для законченных строительством зданий (сооружений) фактический риск аварии не должен превышать значения нормального риска, равного 2.

– для эксплуатируемых зданий и сооружений фактический риск аварии не должен превышать значения критического риска, равного 32.

В своде правил предусмотрено, что заявитель (юридическое или физическое лицо, исполняющее функции застройщика или собственника строительного объекта) имеют право подтверждать соответствие объекта требованию стандарта на выбор либо через процедуру сертификации или посредством его страхования на случай аварийного обрушения. Для этих процедур свод правил устанавливает:

1. Правила идентификации фактического риска аварии объекта.
2. Правила сертификации объектов на соответствие требованию стандарта.
3. Правила тарификация при страховании объектов на случай аварии/

При идентификации риска аварии применяются следующие правила:

Теория расчета строительных конструкций

1. Несущий каркас объекта представляется «деревом» в виде иерархической последовательности возведения групп однотипных конструкций с обязательным включением в их число грунтового основания.

2. В режиме диагностики в каждой входящей в несущий каркас объекта группе конструкций отыскиваются наиболее и наименее дефектные конструкции и для них по специальному правилу [1] устанавливаются уровни опасности.

3. Принятое экспертами решение об уровнях опасности дефектных конструкций подтверждается исследованиями, расчетами или испытаниями. Экспертная информация фиксируется в дефектных ведомостях и специальном документе [1], заверенном ведущим экспертом.

4. По специальной компьютерной программе производятся виртуальные статистические испытания фактического риска аварии объекта, по результатам которых фиксируется следующая итоговая информация:

- Среднее значение фактического риска аварии и среднеквадратичное отклонение риска от среднего значения.

- Размер (в годах) безопасного ресурса исследуемого объекта.

- Диаграмма средних фактических уровней надежности в группах однотипных конструкций несущего каркаса исследуемого объекта.

- Список групп однотипных конструкций несущего каркаса, ранжированный по степени «вклада» каждой группы в величину риска аварии исследуемого объекта.

- Фактический вид технического состояния исследуемого объекта (указывается один из следующих видов: – безопасное, предаварийное, аварийное, ветхо-аварийное).

При сертификации строящихся и эксплуатируемых объектов на соответствие требованиям стандарта применяются следующие правила:

1. Подтверждением соответствия требованию стандарта новых (строящихся) зданий (сооружений) служит доказательство, что фактическое значение среднего риска аварии (R_{ϕ}) законченного строительством исследуемого объекта не превышает нормального значения риска аварии $R_n = 2$, а для эксплуатируемого здания (сооружения), что фактическое значение среднего риска аварии (R_{ϕ}) не превышает критического значения риска аварии $R_{кр} = 32$.

2. Срок действия сертификата соответствия для законченных строительством зданий составляет 22 года [1], а для эксплуатируемых назначается по формуле [1]:

$$T_c = [T_{\phi}(32 - R_{\phi})] / (R_{\phi} - 1),$$

где T_{ϕ} – время эксплуатации объекта на момент сертификации.

3. В случае, если доказано, что исследуемый

объект не соответствует требованию стандарта, риск его аварии подлежит процедуре регулирования, исходя из следующих основных принципов:

- По результатам расследования причин недостаточного уровня конструкционной безопасности исследуемого объекта, в ходе которого выявляются ошибки, допущенные при его возведении (монтаже) и эксплуатации, определяется объем и стратегия восстановительных мероприятий по снижению риска аварии.

- В случае если исследуемый объект находится в аварийном или ветхо-аварийном состоянии, необходимо прежде, чем начать ремонтные работы, предусмотреть специальные меры безопасности для персонала, задействованного в восстановительных мероприятиях.

- Если ликвидировать дефекты в конструкции не удается по техническим причинам или экономическим соображениям, то следует применить дублер-конструкцию, заменяющую и поглощающую риск существующей конструкции в составе несущего каркаса объекта.

- Любое техническое решение по снижению или поглощению риска аварии конкретного объекта должно в обязательном порядке пройти две стадии: – расчетную и проектную.

При добровольном страховании строительного объекта на случай аварии применяются следующие правила:

1. Перед заключением договора страхования производится оценка фактического риска аварии планируемого к страхованию объекта и в случае, если фактическое значение риска аварии превышает критическое значение риска, равного 32, то прежде чем заключить договор страхования необходимо осуществить процедуру регулирования риска аварии на основе принципов, изложенных выше.

2. Нетто-тариф (N), как основа для назначения страховой премии, должен быть адекватен величине фактического риска аварии R_{ϕ} объекта. Он определяется по формуле [1]:

$$N = \{1 - \exp[-0,0365(R_{\phi} - 1)]\} \cdot (1/0,9^{\beta}),$$

где β – коэффициент, учитывающий степень подверженности территории расположения страхуемого объекта внешним факторам риска.

Коэффициент β определяется по следующему правилу: эксперт по правилу табл. 1 назначает индексы подверженности (g) территории расположения объекта каждому из внешних факторов риска, приведенных в табл. 2. Назначенные экспертом индексы (g) сопоставляются со стандартными индексами (g^*), приведенными в табл. 3. Принимается то значение β , для которого сумма квадратов разности стандартных (g^*) и назначенных экспертом (фактических) индексов (g) подверженности имеет минимальное значение: $\sum(g^* - g)^2 \rightarrow \min$. Решение отыскивается в формате табл. 3.

Таблица 1

Правило экспертного назначения индексов подверженности

Подверженность территории фактору риска в форме высказывания	Индекс подверженности (g)
Территория не подвержена фактору риска	1
Вероятность, что территория не подвержена фактору риска, больше, чем подвержена	2
Вероятность, что территория подвержена фактору риска, больше, чем не подвержена	3
Территория подвержена фактору риска	4

Таблица 2

Внешние факторы риска техногенного и природно-климатического характера

№	Внешние факторы риска
1	Близко расположены опасные производства
2	Близко расположены магистральные нефте(газо)проводы
3	Близко расположены ж/д станции, аэродромы
4	Близко расположены линии метрополитена
5	Подтопление территории, близость водоемов
6	Подработанность и (или) закарстованность территории
7	Частые бури, сели, оползни, наводнения
8	Возможность проявления опасных геопроцессов

Таблица 3

Формат определения коэффициента β

Номер внешнего фактора риска	Фактические индексы подверженности (g)	Стандартные наборы индексов (g^*)			
		для $\beta=0$	для $\beta=1$	для $\beta=2$	для $\beta=3$
1	.	1	2	3	4
2	.	1	2	3	4
3	.	1	2	3	4
4	.	1	2	3	4
5	.	1	2	3	4
6	.	1	2	3	4
7	.	1	2	3	4
8	.	1	2	3	4
Суммы квадратов разности стандартных (g^*) и фактических (g) индексов		$\sum(g^* - g)^2$	$\sum(g^* - g)^2$	$\sum(g^* - g)^2$	$\sum(g^* - g)^2$

Наилучшим способом реализации свода правил в строительной практике является экспертная система, которая с одной стороны обеспечивает оперативность и достоверность результатов при сертификации строящихся зданий и сооружений, с другой – информирует заказчика о результатах выполненных исследований с целью своевременного реагирования на фактическую ситуацию риска объекта. В компьютерной версии экспертной системы в основу «оконного» интерфейса положено «дерево» несущего каркаса объекта, которое одновременно служит управляющим механизмом в процессе обследования здания (сооружения), диагностики и оценки технического состояния строительного объекта. На этом «дереве» в режиме оконного интерфейса организован вывод инте-

ресующей пользователя информации, связанной с качеством исполнения отдельных видов строительного-монтажных работ с указанием исполнителя, даты исполнения и уровня (требуемого и достигнутого) конструкционной безопасности конечного продукта.

Заключение. Предложенный свод правил позволяет не только регулировать уровень конструкционной безопасности зданий и сооружений на стадиях строительства и эксплуатации, но и идентифицировать «виновников» недопустимого риска аварии, что дает возможность ввести определенные механизмы персональной ответственности, основанные на финансово-правовых принципах и страховых подходах.

Теория расчета строительных конструкций

Литература

1. Мельчаков, А.П. Оценка и регулирование уровня конструкционной безопасности зданий и сооружений на стадиях строительства и эксплуа-

тации (Теория, методология и инженерные приложения): учеб. пособие/ А.П. Мельчаков, В.Г. Косоогоров, Д.В. Чебоксаров. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – 97 с.

Поступила в редакцию 29 сентября 2008 г.

Мельчаков Анатолий Петрович. Доктор технических наук, профессор кафедры «Строительная механика» Южно-Уральского государственного университета, тел. 8 351 2679000.

Область научных интересов: конструкционная безопасность зданий и сооружений, технологии предупреждения аварий в строительстве.

Anatoly P. Melchakov. Doctor of technical science, professor of the Structural Mechanics department of South Ural State University, telephone 8 351 2679000.

Scientific interests: structural safety of buildings and constructions, technologies of crash prevention in building and construction.

Беззубкова Галина Алексеевна. Старший преподаватель кафедры «Строительство» машиностроительного факультета Миасского филиала Южно-Уральского государственного университета, тел. 8 35135 53285.

Область научных интересов: конструкционная безопасность зданий и сооружений, технологии предупреждения аварий в строительстве.

Galina A. Bezzubkova. Senior lecturer of the Building and Construction department of the Engineering faculty of the Miass branch of South Ural State University, telephone 8 35135 53285.

Scientific interests: structural safety of buildings and constructions, technologies of crash prevention in building and construction.

Косоогоров Валерий Геннадьевич. Ассистент кафедры «Строительная механика» Южно-Уральского государственного университета, тел. 8 351 2679000.

Область научных интересов: конструкционная безопасность зданий и сооружений, ресурс и надежность строительных конструкций.

Valery G. Kosogorov. Assistant lecturer of the Structural Mechanics department of South Ural State University, telephone 8 351 2679000.

Scientific interests: structural safety of buildings and constructions, resource and reliability of building structures.

Чебоксаров Дмитрий Владимирович. Аспирант кафедры «Строительная механика» Южно-Уральского государственного университета, тел. 8 351 2679000.

Область научных интересов: конструкционная безопасность зданий и сооружений, технологии предупреждения аварий в строительстве.

Dmitry V. Cheboksarov. Post-graduate student of the Structural Mechanics department of South Ural State University, telephone 8 351 2679000.

Scientific interests: structural safety of buildings and constructions, technologies of crash prevention in building and construction.

Строительные материалы, изделия и конструкции

УДК 666.97

ПРИМЕНЕНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СФЕРОЛИТНО-РЕШЕТОЧНОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И БЕТОНА

А.С. Королев

APPLICATION OF PHYSICAL MODEL OF SPHERULITIC-LATTICE STRUCTURE WHILE FORECASTING THE STRENGTH OF CEMENT STONE AND CONCRETE

A.S. Korolev

Работа посвящена апробации сферолитно-решеточной модели структуры цементного камня при прогнозировании прочности цементных композитов с учетом фактора неоднородности строения матричного компонента.

Ключевые слова: цементный камень, бетон, прочность, моделирование.

The article describes the approbation of spherulitic-lattice model of cement stone structure while forecasting the strength of cement composites with regard for heterogeneity of the matrix component structure.

Keywords: cement stone, concrete, strength, modeling.

В развитие теоретических представлений о структуре цементного камня и бетона автором была предложена сферолитно-решеточная модель структуры цементного камня. Для проверки действительности данной модели как физической модели структуры матричного компонента цементных композитов было принято решение о проведении аналитических и экспериментальных исследований по вопросу о применимости данной модели в прогнозировании прочности.

При рассмотрении различных видов упаковки цементных образований в сферолитно-решеточных моделях (табл. 1) можно выделить 2 основных элемента, определяющие механические свойства структуры: сферолитные гидратные образования и межгидратное пространство в виде макрокапиллярных пор с гидравлическим радиусом.

Поскольку макрокапиллярные поры являются непрерывной системой и распространяются в направлении отсутствия твердой фазы, а трещины распространяются в направлении разрыва сплошности, макрокапилляры не могут являться направлениями распространения трещин при разрушении под действием механической нагрузки. Вместе с тем очевидно, что прирост макрокапиллярной и общей пористости приводит к снижению плотности и, следовательно, прочности структуры. Для

выявления механизма влияния структурной плотности на прочность гидратной структуры требуется проанализировать модель сферолитно-решетчатой структуры, выделить связи и предложить расчетную физическую модель прочности при сжатии.

С позиции механизма разрушения нарушение целостности при нагружении возникает вследствие растягивающих напряжений, возникающих перпендикулярно направлению приложения нагрузки. Следовательно, разрушение связей обусловлено в горизонтальных связях между сферолитами в модельной решетке. Данный тип нагружения относится к растяжению при изгибе, а, следовательно, пространство под связью или размер макрокапилляра будет определять опорную базу сrostка сферолитов.

Выделим сечения межопорного пространства в сферолитно-решеточных структурах с различной структурной плотностью. Упаковки различной степени уплотнения приведены в табл. 1.

В результате данные сечения обладают приведенным радиусом и могут быть представлены в виде ячейковых пор. Таким образом, цементный камень моделью с позиции прочности при условии постоянной прочности связи между сферолитами можно рассматривать как условно-ячеистую структуру.

Рассмотрим расчетную модель прочности цементного камня на базе модельной ячеистой

Таблица 1

№ п/п	Вид			Выделенное сечение межзерновой пустоты (макропора)
	фронтальный	боковой	верхний	
1				
2				
3				
4				
5				

структуры. Общеизвестно, что прочность ячеистой структуры зависит от прочности межпоровых перегородок и общей пористости (плотности). Для составления математической модели прочности ячеистой структуры был выдвинут ряд тезисов:

- прочность ячеистой структуры равна сумме прочностей гидратных оболочек элементарных ячеек в количестве, приходящемся на нагружаемую площадь;

- прочность элементарной оболочки равна прочности при изгибе твердой перегородки между ячейками;

- перегородка может быть представлена в виде балки с двухопорной схемой нагружения с переводным коэффициентом k , учитывающим арочное строение перегородки (рис. 1).

Предложенная расчетная модель сводится к решению системы уравнений, в котором прочность при сжатии ячеистой структуры может быть выражена как отношение максимальной нагрузки к площади элементарной несущей ячейки.

$$\begin{cases} R_{\text{изг}}^{\text{пер}} = \frac{3kN_{\text{max}}d}{2nd\delta^2} = \frac{3kN_{\text{max}}}{2n\delta^2}; \\ R_{\text{сж}} = \frac{N_{\text{max}}}{n(d+\delta)^2}, \end{cases} \quad (1)$$

где $R_{\text{изг}}^{\text{пер}}$ – предел прочности при изгибе перегородки элементарной ячейки; $R_{\text{сж}}$ – предел прочности при сжатии образца ячеистого бетона; N_{max} – максимальная разрушающая нагрузка образца;

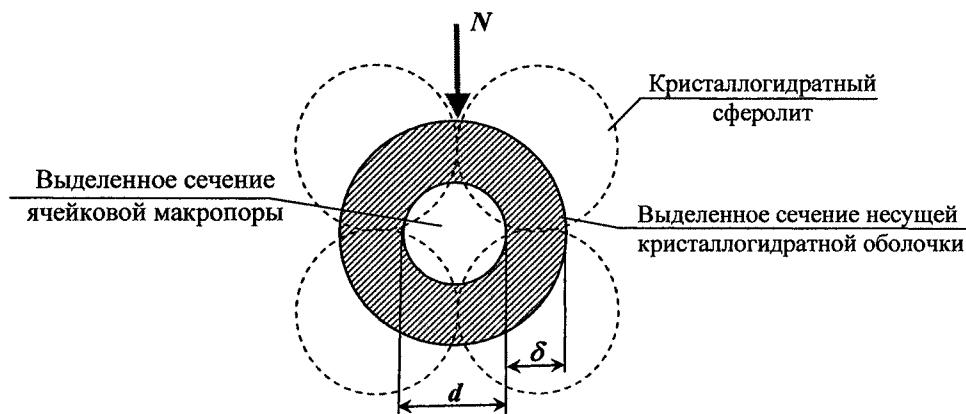


Рис. 1. Схема нагружения элементарной ячейки

d – средний диаметр элементарных пор; δ – толщина межпоровой перегородки; n – количество элементарных пор на единице площади поперечного сечения; k – коэффициент, учитывающий кривизну изгибаемой поверхности.

Выразив из первого уравнения N_{max} и подставив его во второе можно получить следующую зависимость:

$$R_{сж} = \frac{2R_{изг}^{пер} \delta^2}{3k(d + \delta)^2} \tag{2}$$

Толщину межпоровой перегородки можно определить из условия:

$$\delta = \frac{V_{г}}{S_{уд}} \tag{3}$$

где $V_{г}$ – объем гидратной составляющей в образце; $S_{уд}$ – удельная поверхность макрокапиллярных пор образца.

$$\delta = \frac{V_{г}}{n\pi d^2} = \frac{V_{г}}{\frac{PV_{цк}}{\pi d^3/6}} = \frac{V_{г}d}{6PV_{цк}} \tag{4}$$

где P – макропористость материала; $V_{цк}$ – объем цементного камня в естественном состоянии.

При $V_{цк} = 1$

$$R_{сж} = \frac{2R_{изг}^{пер} V_{г}^2}{3k(6P + V_{г})^2} \tag{5}$$

При $V_{г} = 1 - P$

$$R_{сж} = \frac{2R_{изг}^{пер} (1 - P)^2}{3k(1 + 5P)^2} \tag{6}$$

По [1] $P = \frac{B/\Omega - 0,42\alpha}{0,32 + B/\Omega}$

Формула для определения прочности при сжатии цементного камня примет следующий вид:

$$R_{сж} = \frac{2R_{изг}^{пер} (0,32 + 0,42\alpha)^2}{3k(0,32 + 6B/\Omega - 2,1\alpha)^2} \tag{7}$$

При $\alpha = B/\Omega + 0,28$

$$R_{сж} = \frac{2R_{изг}^{пер} (0,44 + 0,42B/\Omega)^2}{3k(4,9B/\Omega - 0,27)^2} \tag{8}$$

Выражение в числителе назовем фактором гидратации, а выражение в знаменателе – фактором пористости.

После вывода за скобки всех постоянных в числителе и знаменателе и коррелирования получена следующая зависимость прочности цементного бетона при сжатии

$$R_{сж} = \frac{0,08R_{ц}(1 + 0,95B/\Omega)^2}{(B/\Omega - 0,055)^2} \tag{9}$$

где $R_{ц}$ – активность вяжущего, МПа.

В табл. 2 приведены сравнительные фактические и расчетные данные прочности при сжатии цементного камня на основе ШПЦ 400, ПЦ 400Д-20 и ПЦ 500 Д-0 различных заводов.

Сравнение расчетных и фактических данных прочности показывает сходимость 90 и более % в 80 % случаев. Коэффициент корреляции полученной зависимости составляет 0,92.

Моделирование и математический анализ прочности цементных композитов проводились на основе учета степени переменности поровой структуры матричного компонента.

Расчетная модель механических свойств такого композита, исходя из разработанной модели цементного камня, представляет собой ячеистую структуру с переменной плотностью в одном направлении, за счет послойного изменения содер-

Таблица 2

Завод-изготовитель	Марка цемента	Активность цемента $R_{ц}$, МПа	НГ, %	Фактическая $R_{сж}$ цементного камня, 28 сут, МПа	Расчетное значение прочности, МПа	Отклонение от факт. значения, %
Невьянский	ПЦ500Д0	43,8	25	128,7	141,12	9,65
	ПЦ400Д20	32,6	25,25	95,7	102,78	7,40
	ШПЦ400	38,8	24,5	120,1	130,67	8,80
Горнозаводский	ПЦ500Д0	47,2	27,5	137,8	124,10	-9,94
	ПЦ400Д20	38,9	28,5	100,5	95,00	-5,48
Коркинский	ПЦ500Д0	47	25	139	151,43	8,94
	ПЦ400Д20	38,1	24,75	115,3	125,48	8,83
	ШПЦ400	29,7	26	87,3	87,92	0,71
Сухоложский	ПЦ500Д0	42,1	23,75	120,6	151,90	25,95
	ПЦ400Д20	35	26,25	108,2	101,51	-6,18
	ШПЦ400	30,4	30,75	69,3	63,69	-8,10
Катав-Ивановский	ПЦ500Д0	51,7	25	151,1	166,57	10,24
	ПЦ400Д20	45,2	25,25	134,3	142,51	6,11
	ШПЦ400	42,2	24,5	132,5	142,12	7,26

жания пор в объеме материала при неизменном составе матричного компонента (рис. 2).

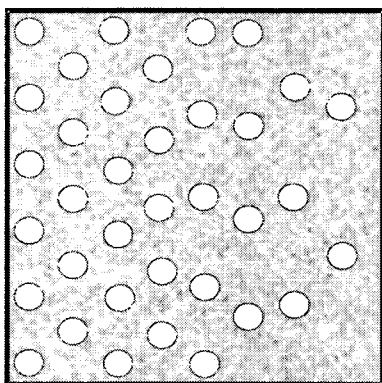


Рис. 2. Схема распределения пор в образце с переменной структурой

Такую структуру недостаточно характеризовать средней величиной структурной плотности

$$D = \frac{(D_{пл} + D_{п})}{2}, \quad (10)$$

но необходимо приводить характеристику степени ее переменности:

$$k_{пер} = \frac{(D_{пл} - D)}{D} = \frac{(D - D_{п})}{D}. \quad (11)$$

Экспериментальные исследования показали, что разноплотные слои в составе одного образца при нагружении работают раздельно, т. е. более легкие слои при превышении их несущей способности сминаются, откалываются и вся нагрузка прикладывается на самые плотные слои. При возрастании степени переменности толщина несущего слоя пропорционально сокращается. Таким образом, переменную ячеистую структуру можно условно разделить на пористый и плотный слои (рис. 3). С целью получения достоверных результатов предела прочности при сжатии испытания образцов вариатропного бетона должны проводиться одним из следующих способов: одновременным испытанием двух образцов или испытанием одного образца между заклиненными плитами прессы.

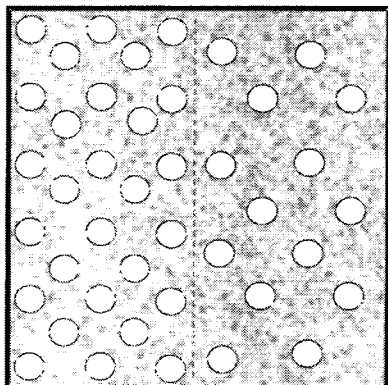


Рис. 3. Схема условного распределения пор по объему образца для математического моделирования. Справа – уплотненный слой (пл), слева – разуплотненный (п)

Учитывая неравномерность распределения матричного компонента по объему, и как следствие неравномерность воспринимаемой нагрузки, прочность бетона с переменной структурой определяется прочностью слоя с плотностью, превышающей среднюю плотность образца:

$$R_{вар} = \frac{N}{S} = R_{пл} k_{пс}, \quad (12)$$

где N – разрушающая нагрузка; $R_{пл}$ – прочность плотного слоя; $S_{пл}$ – площадь плотного слоя; $k_{пс} = S_{пл}/S$ – коэффициент уплотненного слоя (отношение площадей плотного слоя и образца).

Апробация полученной расчетной модели была проведена экспериментально путем создания вариатропных и однородных образцов цементного полистиролбетона, в котором роль ячеек выполняли гранулы невспученного полистирола фракции 0,315...1,25 мм. Поскольку в модельном эксперименте невозможно создать плавное изменение плотности по сечению образца, создание переменной структуры обеспечивалось послойной заливкой единичных слоев различной средней плотности. Таким образом были получены образцы размером 7,07×7,07×7,07 с шестью слоями, причем плотность каждого последующего слоя была больше предыдущего. Шаг изменения плотности задавался исходя из требуемого по эксперименту коэффициента переменности. Плотность слоя регулировалась расходом цемента. В результате была получена зависимость коэффициента слоя и прочности образцов в возрасте 28 сут от степени переменности структуры бетона.

Испытания подтвердили, что структура с переменной плотностью может быть разделена на 2 слоя с позиции поведения под нагрузкой – на жесткий и деформативный, с точки зрения плотности – плотный и пористый. И с позиции прочности и с позиции плотности свойства лимитируются объемом и свойствами плотного слоя. По экспериментальным данным получена математическая зависимость коэффициента плотного слоя (коэффициент корреляции 0,98):

$$k_{пс} = \frac{S_{пл}}{S} = 1 - \cos[1,57(1 - k_{пер})]. \quad (13)$$

Полученная зависимость показывает возможность повышения прочностных свойств бетона на 20...25 % при формировании переменной поровой структуры со степенью переменности 0,3...0,5. Таким образом, переменная структура при сопротивлении проявляет неоднородность, однако формирование переменной структуры, за счет повышенных свойств плотного слоя, является эффективным направлением повышения качества цементных композитов.

При рассмотрении рядовых цементных композитов структура матричного компонента может быть уподоблена переменной структуре, так как пористость у поверхности заполнителя в разы пре-

вышает пористость центрального слоя цементного камня. При рассмотрении заполненных компози- тов в качестве факторов переменности вместо плотности можно применить показатель В/Ц- отношения.

$$k_{пер} = \frac{(В/Ц - В/Ц_{пл})}{В/Ц}; \tag{14}$$

$$k_{пер} = \frac{(В/Ц - НГ)}{В/Ц} = 1 - \frac{НГ}{В/Ц}, \tag{15}$$

тогда

$$k_{пс} = 1 - \cos \left[1,57 \frac{НГ}{В/Ц} \right]. \tag{16}$$

Прочность композита с переменным распре-

Таблица 3

Завод-изготовитель	Марка цемента	НГ, %	В/Ц	R _ц МПа	R _{сж} бетона, 28 сут, МПа	Расчетное значение прочности ЦК, МПа	Козф. уплотн. k _R	Расчетная прочность бетона, МПа	Отклонение от фактич. значения, %
Невьянский	ПЦ500Д0	25	0,36	43,8	67,0	67,84	1,12	75,89	12,4
			0,5		43,8	38,50	1,07	41,29	-5,7
			0,71		25,7	22,90	0,92	21,02	-18,2
	ПЦ400Д20	25,3	0,36	32,6	55,4	50,49	1,11	56,27	1,6
			0,5		32,6	28,65	1,07	30,65	-6,0
			0,71		17	17,04	0,92	15,61	-8,2
	ШПЦ400	24,5	0,36	38,8	71,1	60,09	1,13	67,76	-4,8
			0,5		42	34,10	1,08	36,80	-12,4
			0,71		21	20,29	0,92	18,71	-10,9
Горнозаводский	ПЦ500Д0	27,5	0,36	47,2	66,1	73,10	1,08	79,05	19,6
			0,5		48,3	41,49	1,05	43,46	-10,0
			0,71		24,4	24,68	0,90	22,25	-8,8
	ПЦ400Д20	28,5	0,36	38,9	66,7	60,25	1,07	64,40	-3,5
			0,5		45,9	34,19	1,04	35,57	-22,5
			0,71		24,5	20,34	0,90	18,25	-25,5
Коркинский	ПЦ500Д0	25	0,36	47,1	65,4	72,95	1,12	81,61	24,8
			0,5		50,8	41,40	1,07	44,40	-12,6
			0,71		22,5	24,63	0,92	22,60	0,5
	ПЦ400Д20	24,8	0,36	38,1	59,5	59,01	1,12	66,27	11,4
			0,5		38,1	33,49	1,08	36,02	-5,5
			0,71		17,4	19,92	0,92	18,33	5,3
	ШПЦ400	26	0,36	29,7	46,2	46,00	1,10	50,72	9,8
			0,5		29,7	26,10	1,06	27,71	-6,7
			0,71		14,9	15,53	0,91	14,13	-5,1
Сухоложский	ПЦ500Д0	23,8	0,36	42,1	66,5	65,20	1,14	74,45	12,0
			0,5		42,1	37,00	1,09	40,32	-4,2
			0,71		26,6	22,01	0,93	20,47	-23,0
	ПЦ400Д20	26,3	0,36	35	58,9	54,21	1,10	59,56	1,2
			0,5		35	30,76	1,06	32,57	-6,9
			0,71		27,2	18,30	0,91	16,63	-38,9
	ШПЦ400	30,8	0,36	30,4	48	47,08	1,04	49,18	2,5
			0,5		30,4	26,72	1,03	27,45	-9,7
			0,71		20,2	15,89	0,89	14,16	-29,9
Катав-Ивановский	ПЦ500Д0	25	0,36	51,7	67	80,07	1,12	89,58	24,4
			0,5		51,7	45,44	1,07	48,74	-5,7
			0,71		30	27,03	0,92	24,81	-17,3
	ПЦ400Д20	25,3	0,36	45,2	69,7	70,01	1,11	78,02	11,0
			0,5		45,2	39,73	1,07	42,49	-6,0
			0,71		22,5	23,63	0,92	21,64	-3,8
	ШПЦ400	24,5	0,36	42,2	68,9	65,36	1,13	73,69	6,5
			0,5		42,2	37,09	1,08	40,02	-5,2
			0,71		18,3	22,06	0,92	20,35	11,2

Строительные материалы, изделия и конструкции

делением пор матричного компонента при условии, что в плотном слое В/Ц соответствует нормальной густоте (при В/Ц менее В/Ц-критического) составит по (12)

$$R_c = R_{пл} k_{пс} = R_{шк}^{пр} k_{пс}. \quad (17)$$

Тогда прочность при сжатии цементного композита составит

$$R_{сж} = \frac{0,08 R_{пл} (1 + 0,95 HГ)^2}{(HГ - 0,055)^2} \left(1 - \cos \left[\frac{HГ}{В/Ц} \right] \right); \quad (18)$$

$$k_R = \frac{R_{пл} k_{пс}}{R_{ср}} = \frac{(1 + 0,95 HГ)^2 (В/Ц - 0,055)^2}{(HГ - 0,055)^2 (1 + 0,95 В/Ц)^2} \times \left(1 - \cos \left[1,57 \frac{HГ}{В/Ц} \right] \right). \quad (19)$$

Были определены расчетные и фактические показатели прочности при сжатии бетонов (табл. 3)

на основе портландцементов марок ПЦ 400 Д-20, ШПЦ 400 и ПЦ 500 Д-0 Коркинского, Сухоложского, Невьянского, Катав-Ивановского и Горнозаводского заводов при различных значениях В/Ц (более 45 составов), которые продемонстрировали высокую сходимость – в 90 % случаев ошибка составляет менее 15 %. Коэффициент корреляции новой зависимости составляет 0,88.

Графический вид зависимости для бетона на ПЦ 400 Д-20 Коркинского завода приведен на рис. 4.

Согласно приведенной зависимости, введение заполнителя в состав композита позволяет обеспечить прирост прочности в диапазоне наиболее часто применяемых В/Ц = 0,4...0,6 от 20 до 50 %, особенно в композитах с небольшими расходами цемента. Таким образом, управление переменностью при обеспечении направленного формирования плотного слоя матричного компонента является

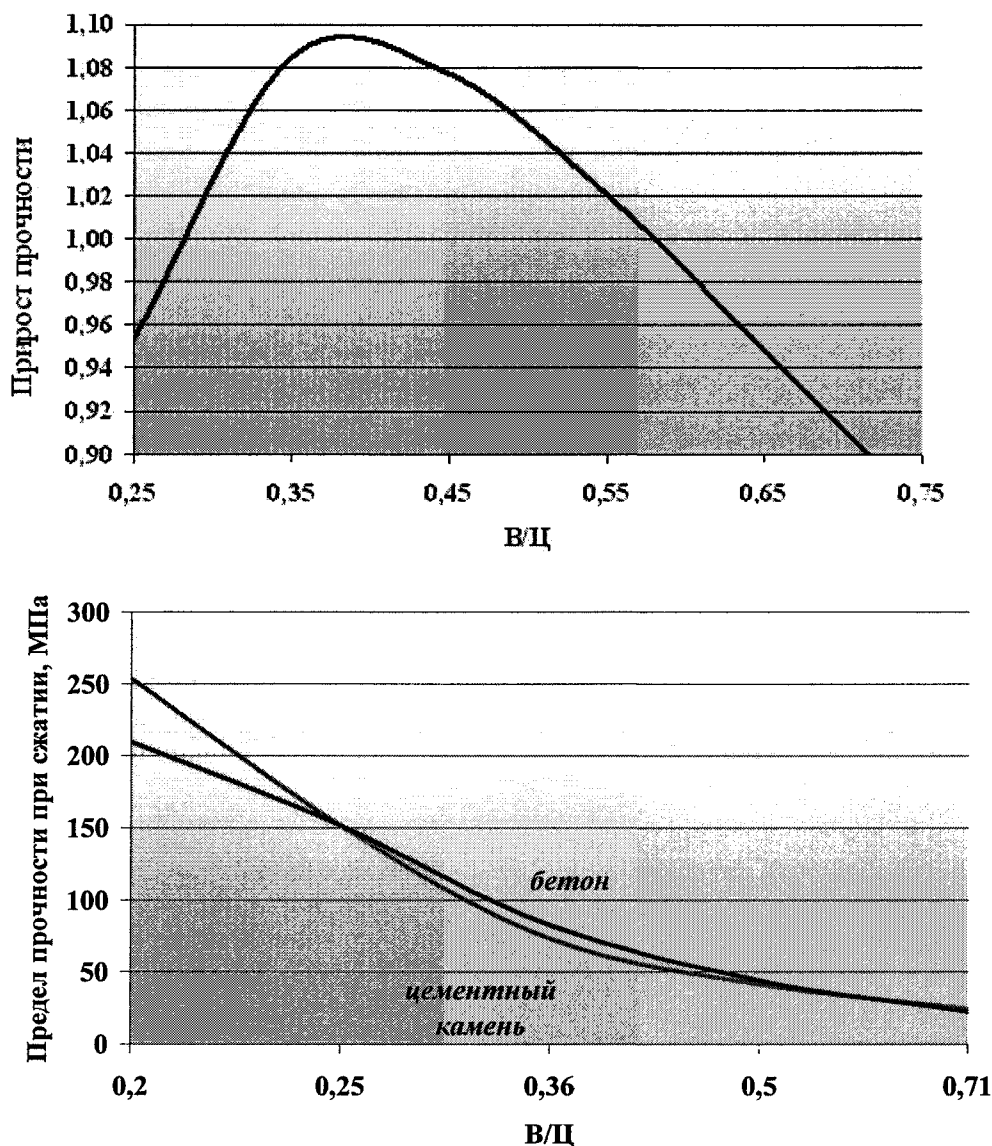


Рис. 4. Расчетные зависимости прироста прочности и прочности при сжатии цементных композитов относительно цементного камня с равномерно распределенным водосодержанием (для ПЦ 400-Д20 Коркинского завода)

эффективным направлением повышения качества цементных композитов.

При введении поверхностно-активных веществ эффект гидравлического самоуплотнения может быть увеличен, а его прирост оценен согласно предложенной зависимости путем учета снижения нормальной плотности цемента или прироста В/Ц у поверхности заполнителя.

Прирост прочности при введении пластификатора составит

$$k_R^{пл} = \frac{R_{пл}}{R} = \frac{(1 + 0,95(1 - k_{ред})НГ)^2 (НГ - 0,055)^2}{((1 - k_{ред})НГ - 0,055)^2 (1 + 0,95НГ)^2} \times \frac{1 - \cos\left(1,57 \frac{(1 - k_{ред})НГ}{В/Ц}\right)}{1 - \cos\left(1,57 \frac{НГ}{В/Ц}\right)}, \quad (20)$$

где $k_{ред}$ – водоредуцирование при введении пластификатора.

Выводы

1. Получена адекватная математическая зависимость прочности цементного камня и бетона от основных факторов состава на базе физической модели сферолитно-решеточной структуры цементного камня.

2. Предложены математические основы учета неоднородности строения поровой структуры матричного компонента цементного композита, на основе которых можно определить предел эффективности снижения В/Ц при получении высокопрочных бетонов.

Литература

1. Состав, структура и свойства цементных бетонов / под ред. Г.И. Горчакова. – М.: Стройиздат, 1976. – 45 с.

2. Баженов, Ю.М. Бетоны повышенной долговечности / Ю.М. Баженов // Долговечность и защита конструкций от коррозии. Строительство, реконструкция. Материалы международной конференции. – М., 1999. – С. 43–48

Поступила в редакцию 5 сентября 2008 г.

Королев Александр Сергеевич. К.т.н., доцент кафедры «Строительные материалы» ЮУрГУ.

Область научных интересов: принципы направленного формирования структуры цементных композитов.

Alexander S. Korolev. Candidate of technical science, associate professor of the Structural Materials department of South Ural State University.

Scientific interests: principles of directional structure formation of cement composites.

ЦЕМЕНТНЫЕ БЕТОНЫ С НАНОДОБАВКАМИ СИНТЕТИЧЕСКОГО ЦЕОЛИТА

Э.Ш. Хакимова

CEMENT CONCRETE WITH NANOADMIXTURES OF SYNTHETIC ZEOLITE

E.S. Khakimova

Работа посвящена модифицированию цементных бетонов нанодобавками синтетического цеолита, получению улучшенных эксплуатационных свойств цементных композитов за счет структурообразования цементного камня на наноуровне.

Ключевые слова: наномодификатор, синтетический цеолит, цементные бетоны, прочность, водонепроницаемость.

The article is devoted to modification of cement concretes by nanoadmixture of synthetic zeolite, improvement of running ability of cement composites due to structure formation of cement stone at the nanolevel.

Keywords: nanomodifier, synthetic zeolite, cement concretes, strength, water resistance.

Технология бетона давно уже не встречается в классическом варианте, где эксплуатационные свойства обеспечивались подбором состава компонентов: вяжущего, заполнителей. В настоящее время широко распространены многокомпонентные системы с применением модификаторов бетона: пластификаторов, ускорителей твердения, воздухововлекающих и другие. Практическое применение модификаторов главным образом направлено на получение материалов с заданными эксплуатационными свойствами, экономии сырьевых материалов и энергоресурсов, повышение технологичности процессов производства.

Материаловедческая наука «шагает в ногу» с другими науками в приоритетном направлении развития научно-исследовательских институтов в сфере нанотехнологий, следуя мировым тенденциям развития nanoиндустрии и потребностям российской экономики.

Последние исследования показывают высокую эффективность применения в качестве минеральных нанодобавок золь и гелей различного происхождения. Перспективным является изучение золь на основе цеолитов, содержащих щелочные оксиды в сочетании с оксидами алюминия и кремния.

Под определением «нанодобавка» понимаются частицы размером от 1 до 1000 нм, что соответствует коллоидной степени дисперсности. Подобные частицы могут быть минеральными и представлять собой молекулярные агрегаты, состоящие из цепочек в 10...20 молекул, или органическими, представляя собой углеводородную цепочку с невысокой молекулярной массой, т. е. мономер.

При обычных условиях минеральные ультрадисперсные частицы склонны к агрегации и самопроизвольному увеличению размера вследствие высокой поверхностной энергии. Аналогией данного процесса является конденсация силикатных паров при возгонке кремния при температуре более 2000 °С. Первоначально диспергированный до молекул силикатный дым при обычных условиях конденсируется до агрегатов размером 5 и более мк, т. е. микроагрегатов. Диспергировать данную систему до наночастиц возможно только при создании соответствующей дисперсионной среды, которой являются различные жидкости, а в основном – вода. На этом основан «золь-гель» метод получения наноструктур [2].

Таким образом, в качестве минеральных нанодобавок следует рассматривать продукты молекулярной конденсации, способные самодиспергироваться в водной среде. К таким системам могут относиться гели различного происхождения – силикатные, глиноземистые, цеолитные.

Формирование высокодолговечной структуры и улучшение свойств тяжелых бетонов возможны при изменении характеристик цементного камня, поэтому было проведено исследование влияния нанодобавки на свойства цементного камня.

Рассмотрим модифицирующее действие неорганических мономеров на примере цеолитного геля. Цеолиты – кристаллические водные алюмосиликаты щелочных или щелочноземельных металлов, соответствующие формуле $MeO \cdot Al_2O_3 \cdot nSiO_2 \cdot H_2O$ (где Me – ион металла) [3]. Содержание в цеолитах активных оксидов натрия, алюминия и кремния обеспечивает им высокую поверхностную активность и высокую адсорбционную способность.

Для получения цеолитного геля синтетический цеолит активировался мокрым помолом в вибромельнице совместно со стабилизатором и после выдержки до полного гелеобразования переводился в коллоидное состояние. Для оценки влияния на гидратационные процессы полученный коллоидный нанопродукт вводился в состав цементного теста в дозировках 0...0,35 % от массы цемента при В/Ц=0,3. Определялась прочность при сжатии цементного камня. На рис. 1 представлены зависимости прочности цементного камня в ранние и марочные сроки твердения от количества цеолитного геля.

Анализируя результаты по прочности цементного камня, можно сделать следующие выводы:

– эффективная дозировка цеолитного геля находится в пределах 0,05...0,1 %;

– введение неорганического мономера в оптимальных пределах ускоряет набор прочности в начальные сроки твердения (7,5...8,0 %), и к марочному возрасту можно наблюдать 50 %-ный рост прочности цементного камня.

При таких малых дозировках механизм модифицирования не может быть объяснен химическим взаимодействием с составляющими цементного камня (свободным гидроксидом кальция). Необходимо учитывать поверхностные явления, возникающие при введении нанодобавки.

Дериватографические исследования показали, что при введении нанодобавки понижается содержание свободной кристаллической извести с 4,2 до 2,95 %. Увеличивается количество химически связанной воды, что характеризует более высокую степень гидратации цементного камня с нанодобавкой. В температурном интервале 700...800 °С процент удаленной воды выше, происходит образование закристаллизованных гидросиликатов кальция. Эти факторы в совокупности способствуют

образованию прочной кристаллической структуры цементного камня (рис. 2).

Данные электронной микроскопии (рис. 3) демонстрируют монолитность структуры цементного камня с нанодобавкой, что является свидетельством повышения прочности и непроницаемости. Наблюдается эффект аморфизации структуры цементного камня.

При введении нанодобавки в мелкозернистые бетоны (рис. 4–7) наблюдается следующая тенденция: повышение конечной прочности при сжатии составляет от 20 до 40 %, прочности при изгибе – от 10 до 20 %.

Исследование влияния нанодобавки на свойства тяжелых бетонов (прочность и водонепроницаемость) марок 200 и 600 представлены на рис. 8–11.

Анализируя результаты исследований влияния добавки на свойства бетонов, можно сделать следующие выводы:

- Выявлены оптимальные дозировки нанодобавки в зависимости от водоцементного отношения: для бетонов невысоких марок по прочности дозировка находится в пределах от 0,05 до 0,1 % от массы цемента, а для бетонов более высоких марок по прочности с пониженным В/Ц – до 0,05 %;

- Наблюдается прирост прочности цементных бетонов при введении нанодобавки синтетического цеолита в оптимальных дозировках на 20...40 % в марочном возрасте;

- Нанодобавки способствуют аморфизации гидросиликатов кальция и омоноличиванию структуры цементного камня. В результате в пределах сверхмалых дозировок (до 0,1 %) достигается прирост водонепроницаемости в 2...3 раза, улучшаются технологические свойства цементных смесей.

Разработанная нанодобавка – синтетического цеолита позволяет решать ряд актуальных задач технологии бетонов:

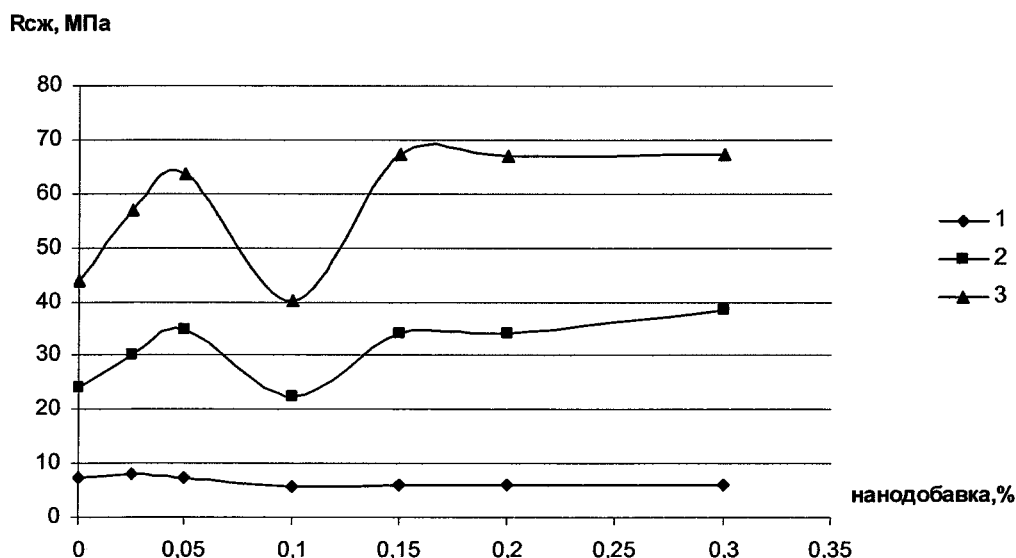


Рис. 1. Зависимость прочности при сжатии цементного камня от количества вводимой нанодобавки: 1 – в 1 сут твердения; 2 – в 7 сут твердения; 3 – в 28 сут твердения

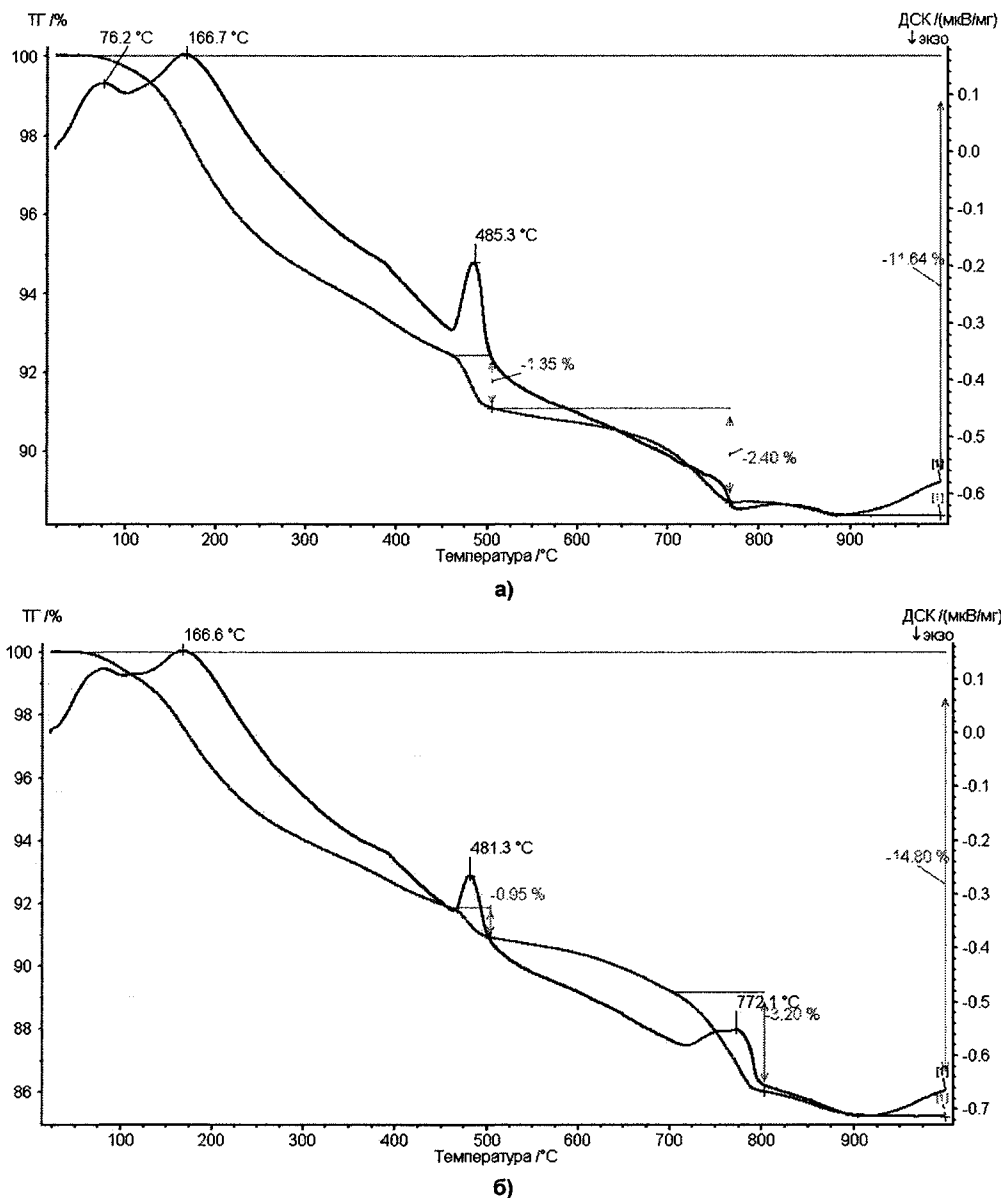


Рис. 2. Дериватогаммы цементного камня в 28 суток твердения: а – 0 % нанодобавки; б – 0,1 % нанодобавки

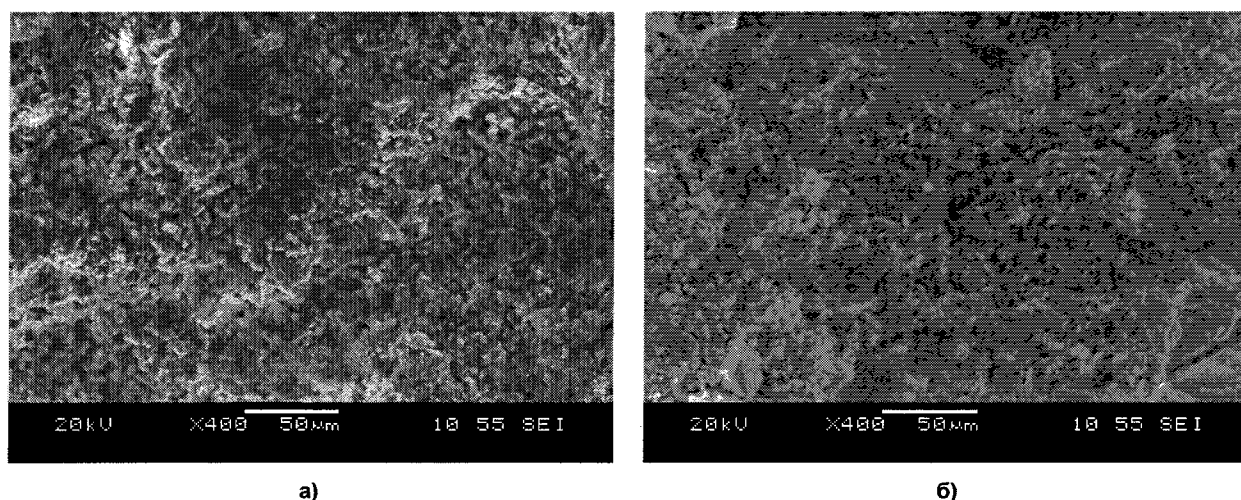


Рис. 3. Электронная микроскопия сколов цементного камня без добавки (а) и с нанодобавкой синтетического цеолита (б)

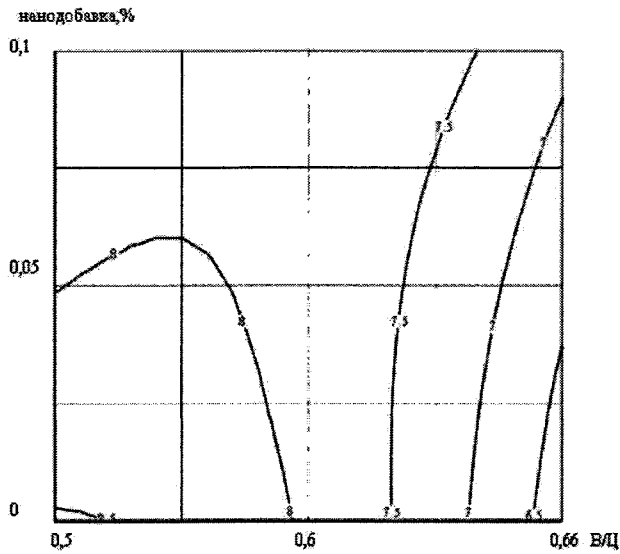


Рис. 4. Зависимость прочности при сжатии мелкозернистого бетона от изменения В/Ц и количества вводимой нанодобавки в 3 сут твердения

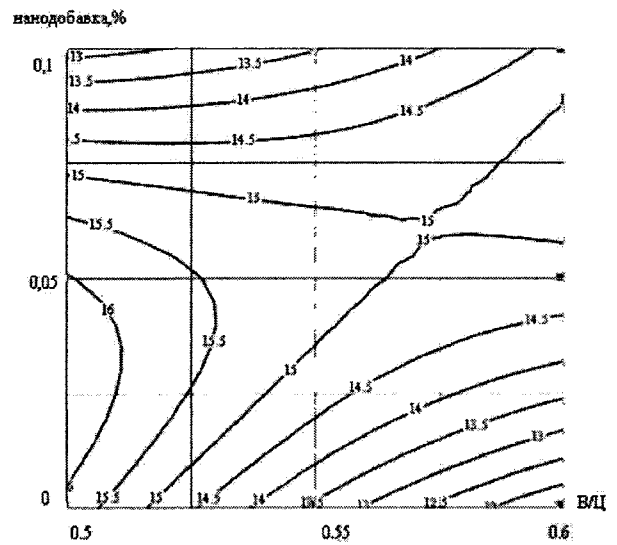


Рис. 5. Зависимость прочности при сжатии мелкозернистого бетона от изменения В/Ц и количества вводимой нанодобавки в 28 сут твердения

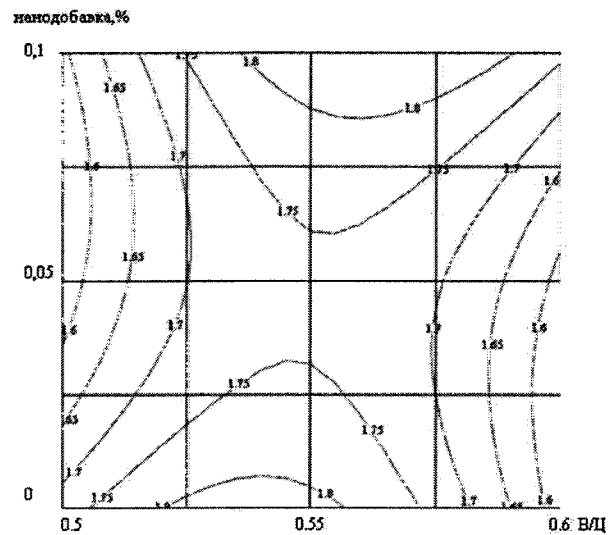


Рис. 6. Зависимость прочности при изгибе мелкозернистого бетона от изменения В/Ц и количества вводимой нанодобавки в 3 сут твердения

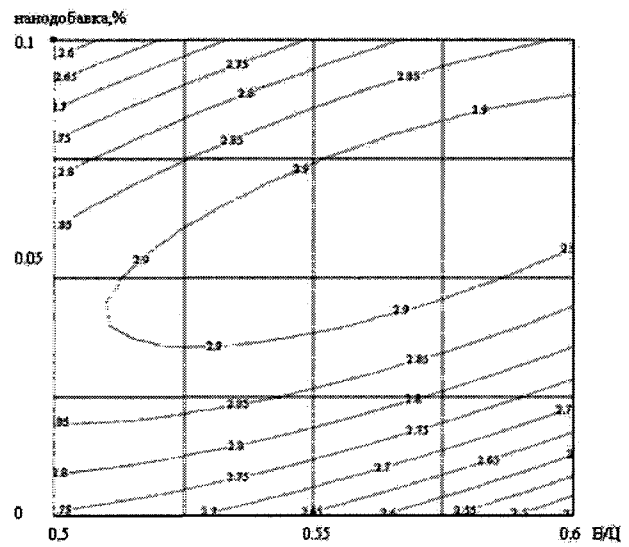


Рис. 7. Зависимость прочности при изгибе мелкозернистого бетона от изменения В/Ц и количества вводимой нанодобавки в 28 сут твердения

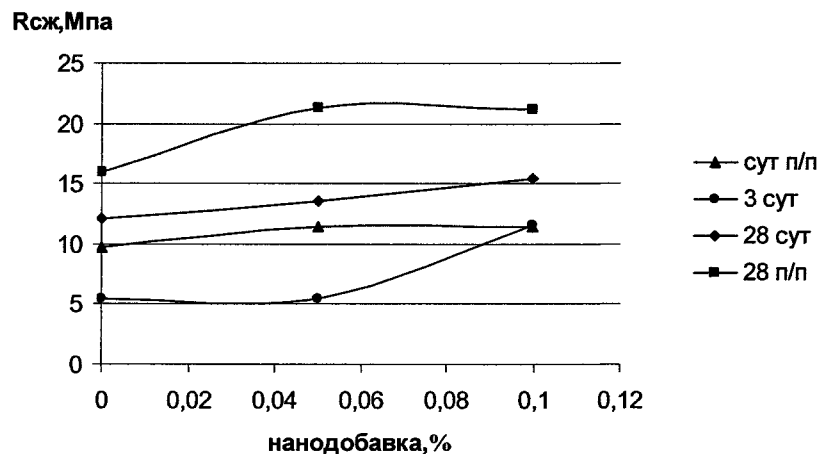


Рис. 8. Зависимость прочности при сжатии бетона марки 200 на Коркинском цементе от количества нанодобавки синтетического цеолита (п/п-после пропарки)

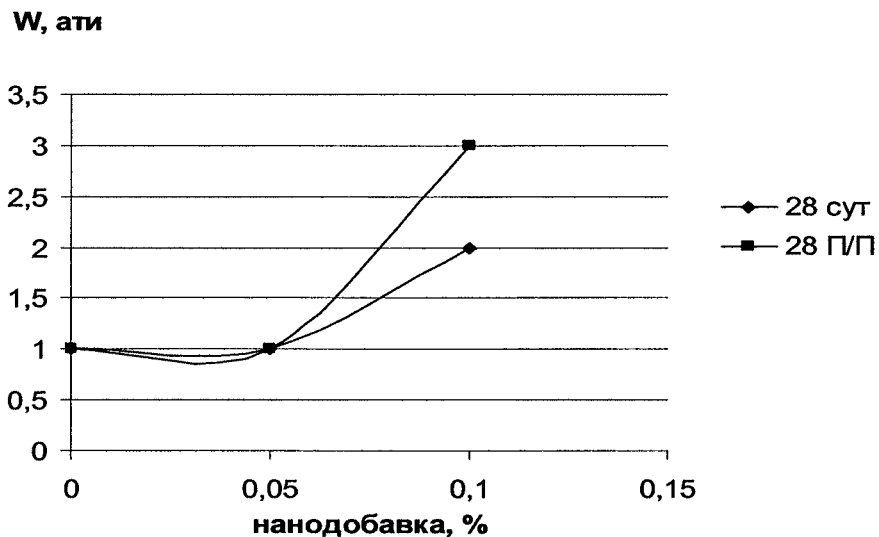


Рис. 9. Зависимость водонепроницаемости бетона марки 200 на Коркинском цементе от количества нанодобавки синтетического цеолита

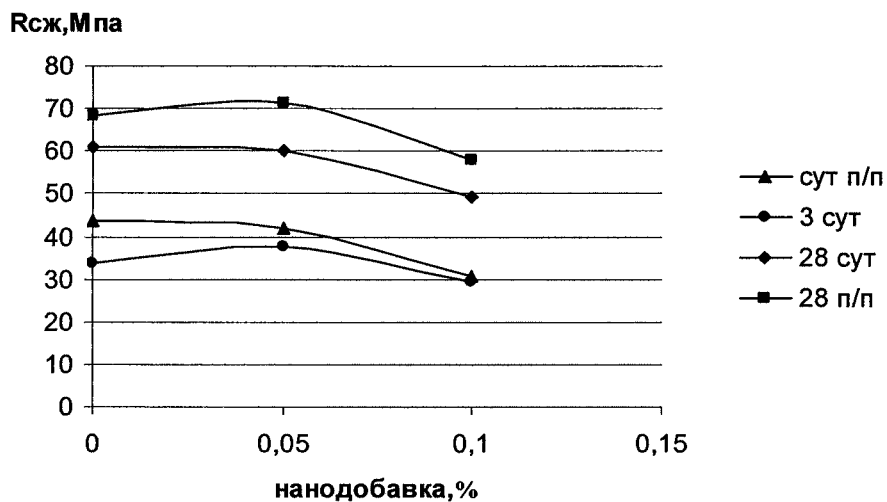


Рис. 10. Зависимость прочности при сжатии бетона марки 600 на Коркинском цементе от количества нанодобавки синтетического цеолита

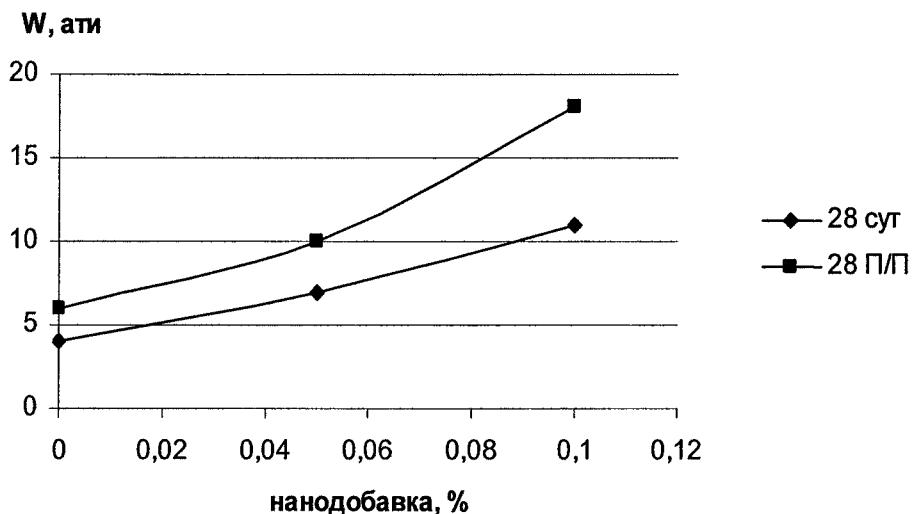


Рис. 11. Зависимость водонепроницаемости бетона марки 600 на Коркинском цементе от количества нанодобавки синтетического цеолита

- обеспечить повышение прочности бетонов до 40 %;
- повысить водонепроницаемость от 50 до 150 %;
- увеличить сохраняемость монолитных бетонных смесей во времени до 2...3 раз;
- обеспечить снижение расхода цемента на 5...10 %.

Литература

1. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика / В.Г. Батраков. –2-е изд., перераб. и доп. – М., 1998 – 768 с.
2. Минько, Н.И. Методы получения и свойства нанобъектов: моногр. / Н.И. Минько, В.М. Нарцев. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2005.–105 с.
3. Жданов, С.П. Синтетические цеолиты / С.П. Жданов. – М.: Химия, 1981. – 264 с.

Поступила в редакцию 25 августа 2008 г.

Хакимова Эльвира Шарифовна. Аспирант кафедры «Строительные материалы» Южно-Уральского государственного университета.

Область научных интересов: модифицирование цементных композитов нанодобавками на основе синтетического цеолита, получение улучшенных эксплуатационных свойств цементных композитов за счет структурообразования цементного камня на наноуровне.

Elvira S. Khakimova. Post-graduate student of the Constructional Materials department of South Ural State University.

Scientific interests: modification of cement composites by nanoaddmixtures on the base of synthetic zeolite, improvement of running ability of cement composites due to structure formation of cement stone at the nanolevel.

ГОРЕЛЫЕ ПОРОДЫ КАК АКТИВНАЯ МИНЕРАЛЬНАЯ ДОБАВКА В БЕТОН

Е.А. Гамалий

BURNT ROCKS AS AN ACTIVE MINERAL ADMIXTURE TO CONCRETE

E.A. Gamaliy

Представлены результаты исследования возможности применения горелых пород шахтных терриконов в качестве активной минеральной добавки в бетон. Показано, что применение горелых пород целесообразно для получения вибропресованных мелкозернистых бетонов.

Ключевые слова: горелые породы, пуццолановая активность, активные оксиды, вибропрессование, мелкозернистые бетоны.

The results of the investigation of the possibility to use burnt rocks of mine waste banks as an active mineral admixture to concrete are presented. It is shown that usage of burnt rocks of mine waste bank is rational for production of vibrocompressed fine concrete.

Keywords: burnt rocks of mine waste banks, pozzolanic activity, active oxides, vibrocompression, fine concrete.

В настоящее время в России остро стоит проблема утилизации отходов и побочных продуктов промышленности. Ежегодно отвалы, занимающие большие площади земель, увеличиваются на сотни тысяч кубометров. Вместе с тем, в связи с интенсивным развитием строительной отрасли в стране возникает дефицит природного минерального сырья, используемого для нужд строительного комплекса. Применение побочных продуктов промышленности в производстве строительных материалов позволяет не только увеличить сырьевую базу стройиндустрии, но и решить значительные экологические проблемы, актуальные для всех регионов с развитой промышленностью.

Металлургические шлаки и золы ТЭС, микрокремнезем и другие побочные продукты промышленности являются самыми востребованными видами техногенного сырья не только в России, но и за рубежом [1].

Менее освоенным источником минерального сырья техногенного происхождения являются горелые породы шахтных терриконов (ГП). Это связано с тем, что в каждом угледобывающем регионе горелые породы отличаются по составу и свойствам. Поэтому возникает необходимость их исследования перед использованием в производстве строительных материалов.

Горелые породы шахтных терриконов – это продукт самообжига пустых пород, извлеченных на поверхность вместе с углем. Физико-химические процессы, протекающие при горении терриконов, подобны технологическим процессам керамиче-

ского производства или получения минеральных вяжущих веществ [2].

Изучение и промышленное использование горелых пород инженером Л.С. Гублером началось в 30-х годах XX века на Донбассе. Дальнейшими исследованиями ГП занимались Г.Н. Сиверцев, И.С. Канцпольский, А.И. Милоградской, Г.И. Книгина и ее ученики.

Горелые породы – это собирательное понятие, включающее большое количество разновидностей отходов угледобычи, отличающихся своими свойствами. Разный минералогический состав пустых шахтных пород и условия естественного процесса выгорания углистой составляющей приводят к образованию продуктов, имеющих разную степень обжига, объединенных в класс «горелые породы». Если сравнивать самообжиг горелых пород в террикониках со сжиганием угля в топках, то породы обжигаются в более трудных условиях, часто в виде больших глыб с ограниченным доступом воздуха и тягой, но зато процесс этот продолжителен и относительно более равномерен. Важной особенностью горелых пород является отсутствие или крайне незначительное количество в них стекловидной фазы, обычно имеющейся в шлаках и золах от пылевидного сжигания топлива [2].

Свойства горелых пород определяются условиями формирования: составом минеральной части, температурой обжига, а также составом газовой среды при горении. Все эти факторы в итоге определяют область применения ГП.

По данным исследователей [2, 3], ГП используют как заполнители для бетонов, в виде актив-

ной минеральной добавки в бетон, а также в качестве компонента композиционных вяжущих в сочетании с гипсом и известью, если содержание углистых примесей в них не превышает 5 %.

Использование ГП в качестве активной минеральной добавки возможно благодаря их пуццолоновой активности. Считается [2, 3], что пуццолоновая активность ГП обусловлена наличием нескольких активных компонентов:

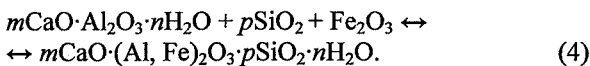
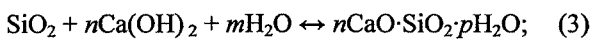
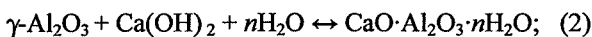
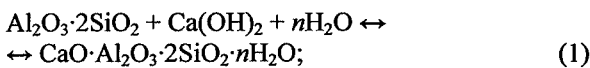
– алюминатного – дегидратированных глинистых минералов (метакаолинит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) и активного глинозема $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$;

– кремнеземистого – растворимого кремнезема SiO_2 ;

– железистого – растворимого Fe_2O_3 .

Присутствие этих веществ в ГП объясняется нарушением молекулярных связей водных алюмосиликатов исходных пород при обжиге, а также активизацией кварца из-за нарушения поверхности и диспергации частиц при пиропроцессах.

Вышеназванные активные вещества могут вступать в реакции следующих типов:



Железистые окислы проявляют активность только в присутствии других активных компонентов, вступая в реакции с гидроалюминатами кальция и растворимым кремнеземом с образованием гидротранатов (4).

Так как содержание активных SiO_2 и Fe_2O_3 в

ГП, как правило, невелико, то их активность в основном носит алюминатный характер, а продукты взаимодействия ГП со свободной известью представляют собой гидроалюмосиликаты и гидроалюминаты кальция.

Целью настоящего исследования является определение возможности применения горелых пород шахтных терриконов г. Копейска в качестве активной минеральной добавки для замены части цемента в мелкозернистых вибропрессованных бетонах.

В работе использовались породы с отвалов шахты «Красная Горнячка», которые сложены термоизмененными алевролитами, песчаниками, реже аргиллитами, конгломератоподобными образованиями в виде спеков.

ГП имеют следующий химический состав: п.п.п. ($1,61\text{--}5,66$), SiO_2 ($40,17\text{--}56,47$), Al_2O_3 ($8,74\text{--}19,74$), Fe_2O_3 ($4,62\text{--}8,39$), FeO ($0,07\text{--}3,85$), CaO ($1,55\text{--}13,88$), MgO ($1,45\text{--}5,4$), SO_3 ($0,94\text{--}2,37$), K_2O ($0,64\text{--}1,78$), Na_2O ($0,32\text{--}0,89$) [4].

Для определения минералогического состава ГП был использован рентгенофазовый анализ (рис. 1), который показал присутствие в ГП следующих минералов: $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ с $d/n = 0,245, 0,228, 0,197, 0,138$ нм; гексаалюмината кальция ($\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$) с $d/n = 0,334, 0,249, 0,212, 0,202, 0,159, 0,154, 0,140$ нм; кианита с $d/n = 0,335, 0,318, 0,236, 0,197, 0,138$ нм; кварца с $d/n = 0,424, 0,334, 0,245, 0,228, 0,212, 0,181, 0,154, 0,145, 0,138$ нм; микроклина с $d/n = 0,383, 0,370, 0,348, 0,337, 0,325$ нм; монотермита с $d/n = 0,435, 0,326, 0,232, 0,206, 0,197, 0,164, 0,149, 0,137$ нм; гематита ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$): $d/n = 0,369, 0,270, 0,221, 0,184, 0,170, 0,149, 0,145$ нм [5].

Проведенные дериватографические исследования (рис. 2) показали наличие эндотермических

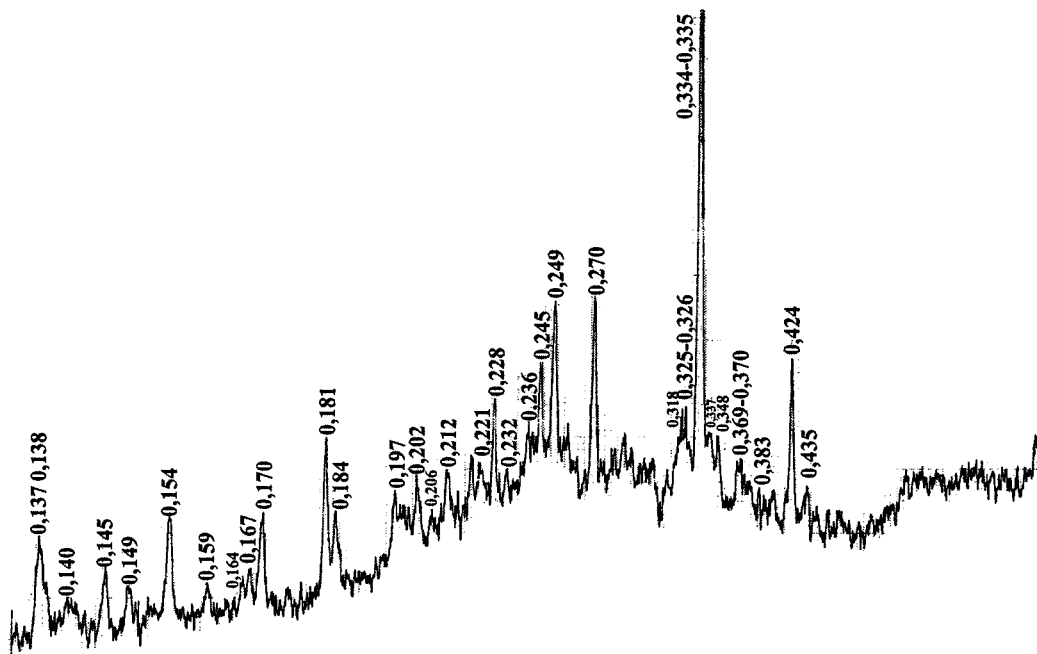


Рис. 1. Рентгенограмма ГП шахты «Красная Горнячка»

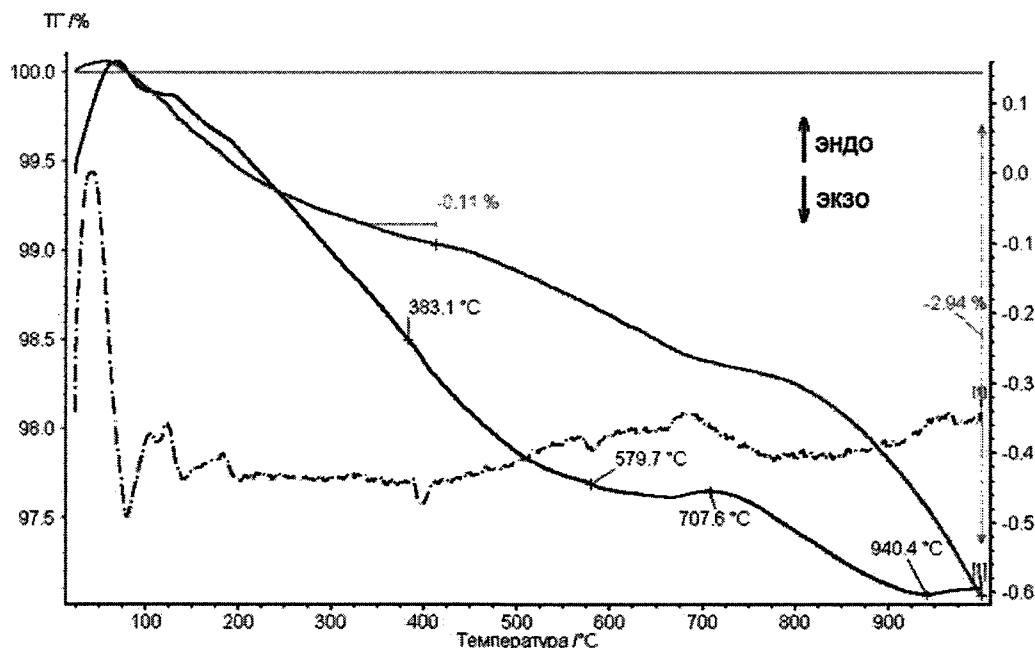


Рис. 2. Дериватограмма ГП шахты «Красная Горнячка»

эффектов при $\sim 380^\circ\text{C}$, $\sim 570^\circ\text{C}$ и $\sim 700^\circ\text{C}$. При $\sim 950^\circ\text{C}$ отмечен экзотермический эффект. Это подтверждает присутствие в ГП глинистых минералов ($\sim 380^\circ\text{C}$ и $\sim 950^\circ\text{C}$), кварца ($\sim 570^\circ\text{C}$) и гематита ($\sim 700^\circ\text{C}$). Можно сделать вывод о том, что степень обжига данных ГП высокая (п.п.п. = 2,94 %).

Для выявления возможности применения ГП в качестве активной минеральной добавки, используемой для производства цемента, а также вводимой в состав вяжущего при изготовлении бетонов и растворов, были проведены испытания согласно ГОСТ 25094–94 «Добавки активные минеральные для цемента. Методы испытаний». Было изготовлено по 12 растворных образцов-балочек, включающих в качестве вяжущего в первом случае смесь из портландцемента 500-Д0-Н ГОСТ 10178–85 производства ОАО «Сухоложскцемент» и тонкомолотых горелых пород, а во втором – смесь портландцемента и тонкомолотого песка в тех же пропорциях. Средние результаты испытаний приведены в таблице.

Результаты испытаний образцов-балочек на прочность

Состав с добавкой горелых пород		Состав с добавкой молотого песка	
$R_{изг}$, МПа	$R_{сж}$, МПа	$R_{изг}$, МПа	$R_{сж}$, МПа
3,4	11,1	1,5	4,3

В результате статистической оценки значимости различий прочности при сжатии образцов с добавкой горелых пород и образцов с песком по ГОСТ 25094–94 был рассчитан критерий Стьюдента t , который составил 27,9. При t свыше 2,07 добавка считается выдержавшей испытания на активность по прочности. Таким образом, добавка

горелых пород является активной и может быть использована для производства цемента.

Для того чтобы определить влияние условий твердения, а также тонкости помола ГП и их количества на прочность камня вяжущего при сжатии, были проведены испытания образцов-кубов с ребром 2 см. Образцы изготавливали из теста вяжущего нормальной густоты по ГОСТ 310.3–76 (2003). В состав вяжущего входил цемент ПЦ 400-Д20 производства ЗАО «Уралцемент», а также горелые породы, размолотые до удельной поверхности 5000 и 7800 $\text{cm}^2/\text{г}$. Образцы испытывали в возрасте 3 и 28 суток водного твердения или 1 и 28 суток после тепло-влажностной обработки (ТВО). В результате предварительных исследований [6] было установлено, что наиболее благоприятным является следующий режим ТВО: выдержка при температуре 20°C – 2 часа; подъем температуры со скоростью $15^\circ\text{C}/\text{ч}$ до температуры 75°C ; изотермическая выдержка при температуре 75°C продолжительностью 8 часов. Результаты испытаний представлены на рис. 3–6.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что оптимальное содержание горелых пород в вяжущем составляет 30 %. При этом потеря прочности камня вяжущего в возрасте 28 суток после ТВО относительно прочности цементного камня без добавки ГП составляет около 6 %, а экономия цемента существенна.

Прочность камень вяжущего после ТВО с горелой породой, имеющей удельную поверхность $7800 \text{ cm}^2/\text{г}$, на 10–15 % выше прочности камня, в котором содержится ГП с удельной поверхностью $5000 \text{ cm}^2/\text{г}$. Так как ГП легко размалываются, то можно использовать в качестве добавки к цементу ГП с удельной поверхностью $7500\text{--}8000 \text{ cm}^2/\text{г}$.

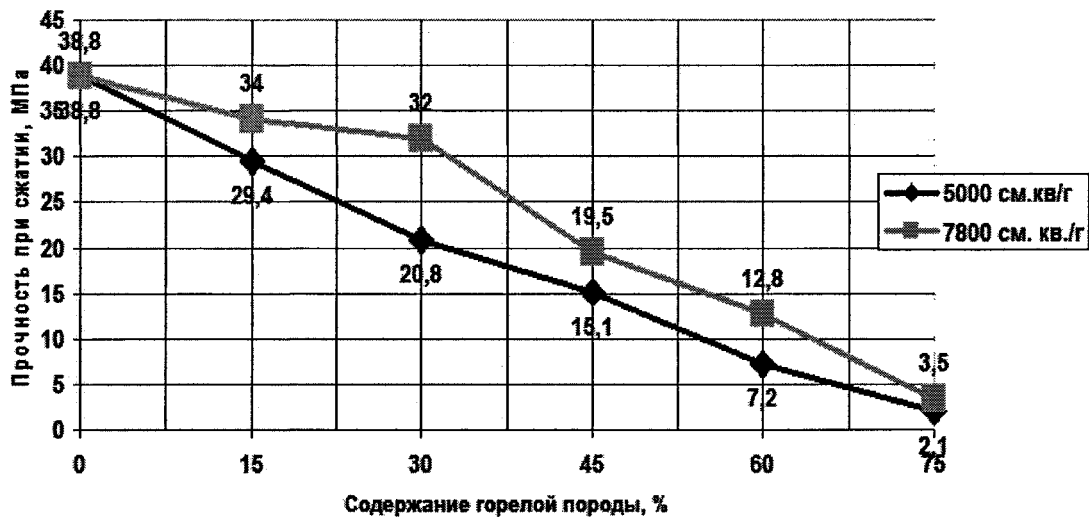


Рис. 3. Прочность камня вяжущего в возрасте 3 суток водного твердения

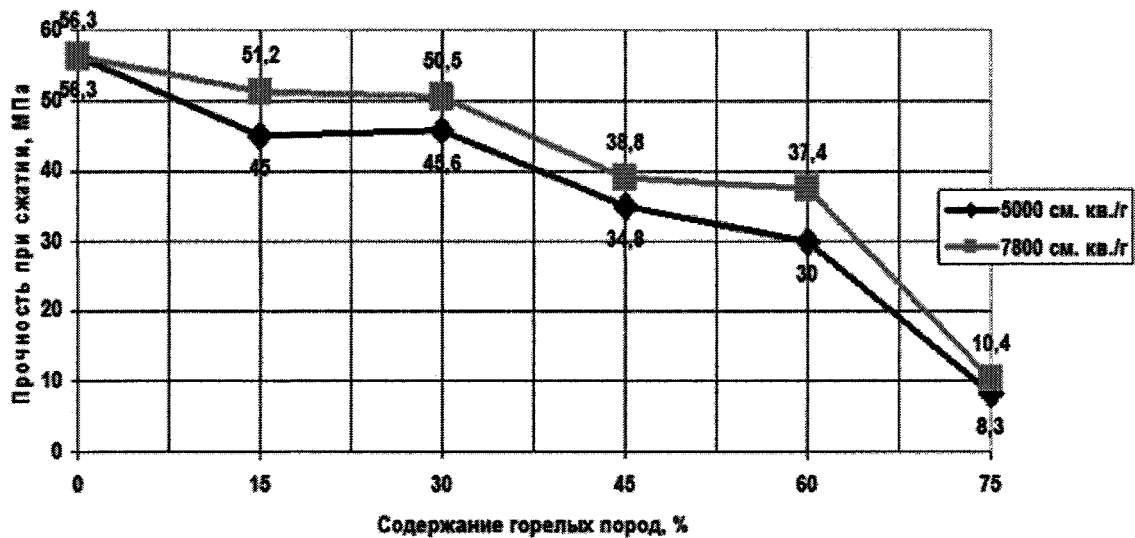


Рис. 4. Прочность камня вяжущего в возрасте 1 сутки после ТВО

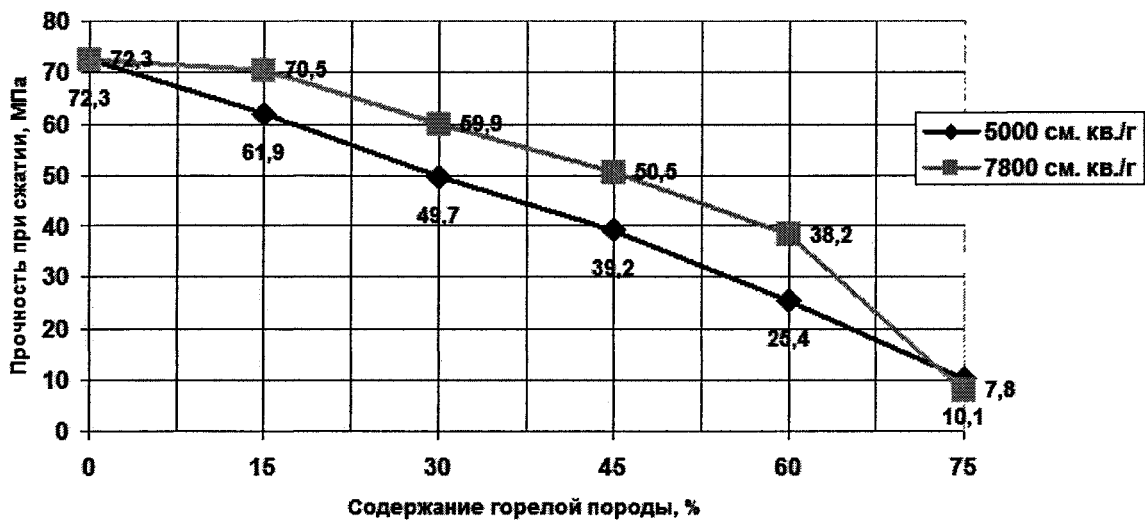


Рис. 5. Прочность камня вяжущего в возрасте 28 суток водного твердения

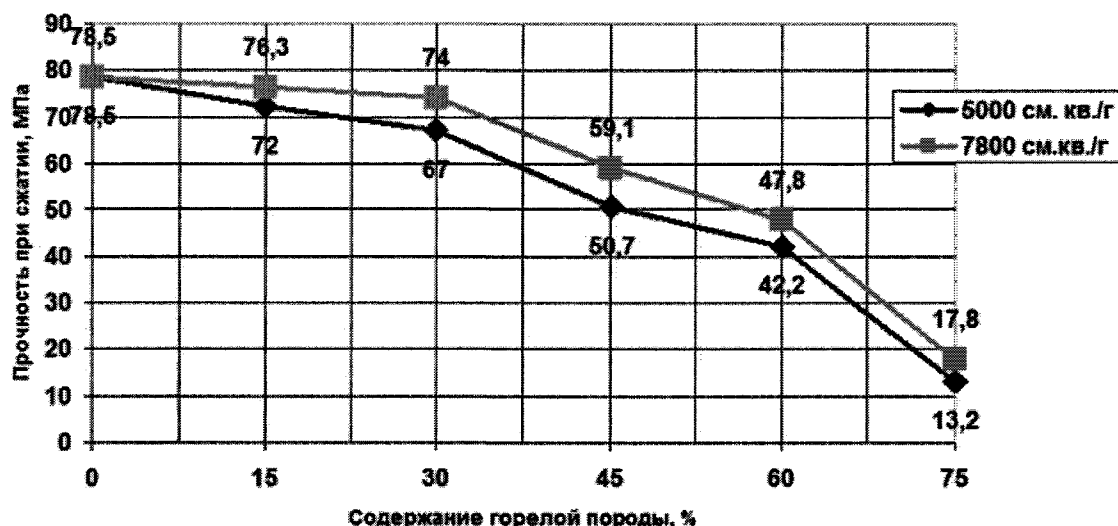


Рис. 6. Прочность камня вяжущего в возрасте 28 суток после ТВО

После тепло-влажностной обработки образцов цементного камня, включающего ГП в количестве до 30 %, достигается прочность значительно выше, чем при водном твердении. Таким образом, ТВО позволяет активизировать ГП, а также получить 80 % прочности уже после первых суток твердения.

Известно, что данные о количественном содержании гидроксида кальция в цементном камне могут косвенно характеризовать активность минеральной добавки, введенной в вяжущее. С помощью дифференциально-термического анализа по потерям массы при дегидратации портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ было определено его содержание в камне вяжущего, включающего ГП (рис. 7).

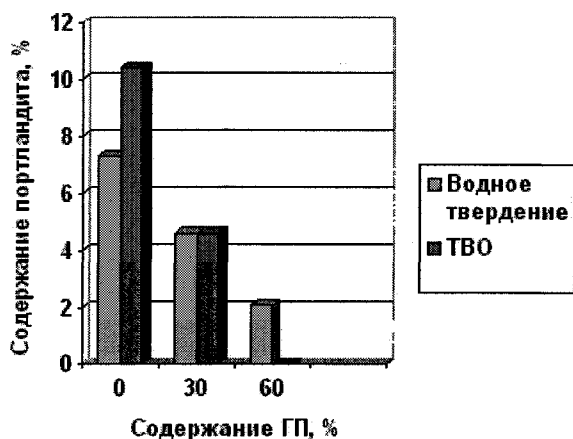


Рис. 7. Влияние дозировки горелых пород и условий твердения на содержание портландита в камне вяжущего в возрасте 28 суток

По полученным результатам видно, что с увеличением количества ГП в вяжущем содержание $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в камне, подвергнувшись ТВО, существенно снижается. Это подтверждает увеличение пуццолановой активности ГП после тепло-влажностной обработки.

Одним из перспективных направлений применения вяжущих композиций, содержащих ГП,

является производство мелкоштучных стеновых изделий методом вибропрессования, который позволяет отказаться от дорогостоящей бортоснастки, значительно сокращает цикл производства изделий, обеспечивает высокую производительность и точность размеров готовых изделий [7].

Для разработки эффективных вибропрессованных композиций с использованием ГП применяли математические методы планирования эксперимента. В качестве варьируемых факторов были выбраны:

- X_1 – отношение «цемент:песок» (Ц:П): от 1:4 до 1:6;
- X_2 – содержание горелых пород: от 25 до 35 % от массы цемента.

В качестве сырьевых материалов использовались: песок карьера «Хлебороб», цемент ПЦ 400-Д20 (ЗАО «Уралцемент»), ГП (7800 см²/г).

Из мелкозернистого бетона изготавливали образцы-цилиндры с диаметром и высотой 5 см при давлении пригруза 250 см²/г за время прессования 90 секунд. Формовочная влажность составляла 8 % от массы смеси. После изготовления образцы подвергали ТВО по вышеуказанному режиму. Результаты испытаний представлены на рис. 8.

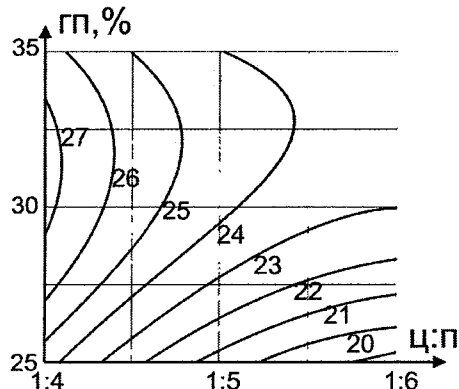


Рис. 8. Прочность при сжатии мелкозернистых бетонов в возрасте 28 суток, МПа

Была получена следующая регрессионная зависимость прочности при сжатии марочном возрасте:

$$R(x_1, x_2) = 22,49 - 1,67x_1 - 0,13x_2 + 0,96x_1^2 + 0,75x_1x_2 - 1,86x_2^2. \quad (5)$$

Морозостойкость разработанных материалов составила более 100 циклов.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Горелые породы шахтных терриконов г. Копейска могут применяться как активная минеральная добавка в бетоны при условии предварительного усреднения и размола до удельной поверхности 7500–8000 см²/г.

2. Максимальная пуццолановая активность ГП проявляется термообработкой бетонов с этими добавками при 70–75 °С

3. Оптимальное количество добавки ГП составляет 30 % от массы цемента.

4. Использование ГП в мелкозернистых вибропрессованных бетонах в качестве активной минеральной добавки, в количестве 25–35 % от массы цемента, позволило получить материалы с маркой по прочности М 200–250 и морозостойкостью более 100 циклов.

5. Применение горелых пород позволяет придать мелкоштучным стеновым материалам архитектурную выразительность за счет красивого розового цвета.

Литература

1. Scrivener, K.L. *Innovation in Use and Research on Cementitious Material* / K.L. Scrivener, R.J.

Kirkpatrick // *Proceedings of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement*. – Montreal, 2007. – P. 358–278.

2. Книгина, Г.И. *Строительные материалы из горелых пород* / Г.И. Книгина. – М.: Стройиздат, 1966. – 207 с.

3. Сиверцев, Г.Н. *Процессы при твердении топливных шлаков и горелых пород* / Г.Н. Сиверцев // *Химические процессы твердения бетонов: сб. докл.* – М.: Госстройиздат, 1961. – С. 108–122.

4. *Оценка пригодности отходов добычи углей Копейского угленосного района Челябинского угольного бассейна для получения минерального волокна и других видов продукции: отчет о НИР (заключ.)* / ВНИГРИуголь; рук. Л.В. Гитич. – Ростов-на-Дону, 2003. – 80 с.

5. Горшков, В.С. *Методы физико-химического анализа вяжущих веществ* / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – М.: Высшая школа, 1981. – 333 с.

6. Гамалий, Е.А. *Исследование пуццолановой активности горелых пород шахтных терриконов* / Е.А. Гамалий, С.П. Горбунов, Б.Я. Трофимов // *Прогрессивные материалы и технологии в современном строительстве: междунар. сб. науч. тр.* – Новосибирск, 2007–2008. – С. 110–114.

7. Шейкин, А.Е. *Структура и свойства цементных бетонов* / А.Е. Шейкин, Ю.В. Чеховский, М.И. Бруссер. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.

Поступила в редакцию 22 сентября 2008 г.

Гамалий Елена Александровна. Аспирант кафедры «Строительные материалы» ЮУрГУ. E-mail: lenawillis@rambler.ru.

Область научных интересов: исследование горелых пород шахтных терриконов как сырья для производства строительных материалов, изучение влияния добавок-пластификаторов на основе эфиров поликарбоксилатов на свойства цементных композиций.

Elena A. Gamaliy. Post-graduate student of the Constructional Materials department of South Ural State University. E-mail: lenawillis@rambler.ru.

Scientific interests: research of burnt rocks of mine waste banks as raw materials for production of constructional materials, study of the influence of plasticizer based on ethers of polycarboxylates on the cement compositions properties.

ЦЕМЕНТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ШЛАКОВ ОКИСЛЕННЫХ НИКЕЛЕВЫХ РУД ОАО «УФАЛЕЙНИКЕЛЬ» В КАЧЕСТВЕ АКТИВНОЙ МИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКИ

Д.Е. Синуцын

CEMENTS WITH USAGE OF SLAGS OF OXIDIZED NICKEL ORES OF ОАО "UFALEYNIKEL" AS AN ACTIVE MINERAL ADMIXTURE

D.E. Synytsyn

Рассмотрена возможность применения молотых шлаков окисленных никелевых руд ОАО «Уфалейникель» в качестве активной минеральной добавки в составе портландцементов. Доказано, что добавка шлака в составе вяжущего не приводит к снижению прочности цементного камня при оптимальных его дозировках. Проведены долгосрочные испытания, из которых видно, что цементный камень с добавлением шлака не снижает свои прочностные показатели.

Ключевые слова: вяжущее, цемент, шлак, активная минеральная добавка, прочность при сжатии, контрольные образцы.

The possibility of usage of ground slags of oxidized nickel ores of ОАО "Ufaleynikel" as an active mineral admixture in the formulation of Portland cement is considered. It is proved that the addition of slag to the formulation of bonding substance does not lead to the degradation of set strength retrogression by its optimum dosages. Long-term tests proving that cement stone with addition of slag does not reduce its strength properties are conducted.

Keywords: bonding substance, cement, slag, active mineral admixture, compression strength, check samples.

Деятельность добывающих и перерабатывающих отраслей промышленности вызывает образование и дальнейшее накопление огромных количеств различных отходов [1], которые создают серьезные проблемы в области защиты окружающей среды и сохранения природных ресурсов.

Использование вторичных ресурсов и, прежде всего, промышленных отходов чрезвычайно важно по ряду причин – это обеспечивает производство богатым источником дешевого и часто уже подготовленного сырья; приводит к экономии капитальных вложений, предназначенных для строительства предприятий добывающих и перерабатывающих сырья, и повышению уровня их рентабельности, высвобождению значительных площадей земельных угодий и снижению степени загрязнения окружающей среды, экономии тепловой энергии и т. д. Поскольку объем промышленных отходов постоянно возрастает [1], последовательное повышение уровня их использования становится важнейшей общегосударственной задачей.

Производство вяжущих материалов относится к наиболее эффективным областям применения металлургических шлаков. Без корректировки состава гранулированный шлак медно-никелевого производства, хотя и не обладает способностью к

самостоятельному твердению, но может служить активным компонентом в составе вяжущего.

В данной работе использовались следующие материалы: шлак окисленных никелевых руд ОАО «Уфалейникель», портландцемент ПЦ 400-Д20 Коркинского цементного завода.

По данным рентгенофазового анализа основная масса гранул шлака окисленных никелевых руд представлена магнезиально-железистым стеклом, содержащим в небольших количествах кристаллы оливина, сульфиды (капли штейна) и эмульсионную вкрапленность магнетита [3]. Оливин, содержание которого составляет около 5...10 %, встречается в стекле в виде короткопризматических и игольчатых кристаллов. Сульфиды (капли штейна) образуют округлые, линзовидные и неправильные обособления с четкими границами. Химический состав данного материала представлен в табл. 1.

Портландцемент ПЦ400-Д20 по ГОСТ 10178 производства Коркинского цементного завода обладает следующим минералогическим составом цементного клинкера: C_3S – 58...60 %; C_2S – 5,5...7,0 %.

Химический состав цемента приведен в табл. 2.

Нормальная густота цементного теста – 23,87 %.

Сроки схватывания: начало – 1 ч 39 мин; конец – 3 ч 04 мин.

Таблица 1

Химический состав шлаков окисленных никелевых руд

Содержание основных окислов, %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	R ₂ O	SO ₂	Остальное
33,4	3,4	2,1	46,6	11,2	1,7	0,6	0,3	0,7

Таблица 2

Химический состав цемента

Химический состав цемента, %								ППЦ, %
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CaO _{св}	R ₂ O	
21,38	5,55	3,92	62,44	1,25	2,65	0,35	0,70	1,11

Для изучения влияния добавки молотого шлака окисленных никелевых руд ОАО «Уфалейникель» в качестве активной минеральной добавки в составе портландцемента, его размалывали в лабораторном виброистирателе. Остаток на сите 008 составлял около 6,5 %, что соответствует удельной поверхности рядовых портландцементов.

При изучении влияния добавки молотого шлака окисленных никелевых руд на свойства портландцемента изменяли его процентное содержание. Количество добавки варьировалось от 0 до 100 % по массе. На полученном вяжущем определяли изменение нормальной плотности теста в зависимости от содержания добавки молотого шлака, а так же кинетику набора прочности образцов цементного камня. Испытания прочностных показателей включали данные полученные после испытания образцов, твердевших в течение продолжительного времени – два года.

В результате проведенных опытов было установлено, что введение в состав портландцемента молотого шлака окисленных никелевых руд приводит к снижению нормальной плотности теста. Кривая изменения нормальной плотности цементного теста в зависимости от дозировки молотого шлака приведена на рисунке. Уменьшение нормальной плотности теста, по-видимому, можно объяснить стекловидной структурой шлаков.

Прочностные свойства комплексного вяжущего, состоящего из смеси портландцемента и молотого шлака окисленных никелевых руд изучали на образцах-кубиках размером 20×20×20 мм. За-

формованные образцы подвергали тепловлажностной обработке по режиму 80С (2+6+12). Дальнейшее твердение образцов происходило в камере нормального твердения.



Изменение нормальной плотности цементного теста в зависимости от содержания молотого шлака

Из цементного теста нормальной плотности и молотого гранулированного шлака окисленных никелевых руд были заформованы образцы-кубики. Содержание шлака варьировалось от 0 до 100 %.

По результатам проведенных исследований были получены следующие зависимости набора прочности цементного камня (табл. 3).

Как видно из табл. 3, прирост прочности про-

Таблица 3

Кинетика набора прочности образцов с добавлением молотого шлака окисленных никелевых руд

Сроки твердения, сут	Прочность при сжатии, МПа					
	Содержание шлака в составе вяжущего, %					
	100	80	60	40	20	0
1	1,7	32,6	39,5	57,5	65,7	68,7
3	2,4	30,6	40,0	63,8	51,0	54,3
7	2,5	33,4	42,5	71,4	69,4	90,8
28	3,7	31,8	55,2	77,3	78,9	89,5
800	4,5	44,3	57,7	83,7	85,4	95,5

должается в течение двух лет. Для различных дозровок молотого шлака прирост прочности составил до 40 %. Оптимальное содержание шлака в составе вяжущего с позиции получения наибольшей прочности и максимальной экономии цемента находится в интервале 30...40 %.

Механизм гидратации шлаковых стекол заключается в проникновении в стекло отрицательно заряженных гидроксильных ионов, нарушающих электростатическое равновесие системы и приводящих к разрушению шлака [2]. При обычных условиях без активизирующих добавок гидратации препятствует образование на поверхности частичек стекла пленок гидратированного кремнезема. Разрушению этих пленок и обнажению новых поверхностей шлаковых зерен способствует введение в водный раствор щелочных соединений и сульфатов, содержащих ионы Ca^{2+} , $(\text{OH})^-$ и $(\text{SO}_2)^{2-}$. При щелочной активизации гидратированный кремнезем связывается в гидросиликаты и гидроалюмосиликаты кальция, при сульфатной – сульфат кальция непосредственно взаимодействует с глиноземом, гидратом окиси кальция и водой с образованием гидросульфалюминатов. Эффект щелочной и сульфатной активизации увеличивается с повышением основности шлаков. При сульфатном возбуждении активность шлаков растет также по мере увеличения их алюминатности. Роль щелочных активизаторов могут выполнять известь, щелочи, сода и другие соли щелочных металлов и слабых кислот, портландцемент, а сульфатных – двуводный или полуводный гипс, ангидрит, сульфат натрия.

В результате проведенных исследований выявлено, что добавление молотого шлака в состав

портландцементов, при оптимальных дозировках, не приводит к значительному уменьшению прочности цементного камня по сравнению с бездобавочным цементным камнем. Установлены зависимости набора прочности цементного камня при различных дозировках добавки. Проведены долгосрочные испытания в которых показана кинетика набора прочности цементного камня с добавлением молотого шлака в течение длительного периода времени.

Применение молотых шлаков окисленных никелевых руд в качестве активной минеральной добавки приведет к экономии клинкера при производстве вяжущего, сокращению себестоимости производства цемента, а так же сокращению шлаковых отвалов.

Литература

1. Трамбовецкий, В.П. *Использование промышленных отходов в строительстве* / В.П. Трамбовецкий // *Бетон и железобетон*. – 1980. – № 8. – С. 29–30.
2. Заровнятных, В.А. *Экономическая эффективность использования никелевых шлаков в условиях Заполярья* / В.А. Заровнятных, Г.Л. Рабченко, А.Л. Розовский // *Промышленность строит. материалов: научно-технич. реф. сб. ВНИИЭСМ. Сер. 11. Охрана окружающей среды*. – М., 1982. – Вып. 3. – С. 145–159.
3. Гуревич Б.И., Добрынина Н.Г. *Гранулированные никелевые шлаки как заполнитель для бетонов и растворов* / Б.И. Гуревич, Н.Г. Добрынина // *Строительные и технические материалы из минерального и техногенного сырья Кольского полуострова*. – Л., 1979. – С. 33–36.

Поступила в редакцию 22 сентября 2008 г.

Синицын Дмитрий Евгеньевич. Аспирант кафедры «Строительные материалы» Южно-Уральского государственного университета.

Область научных интересов: утилизация побочных продуктов промышленности; морозостойкость бетона; дисперсное армирование бетонов; формирование структуры бетонов с максимально плотной упаковкой зерен.

Dmitry E. Synytsyn. Post-graduate student of the Constructional Materials department of South Ural State University.

Scientific interests: utilization of the by-products of industry; freeze resistance of concrete; disperse reinforcing of concrete; concrete structure formation with the closest-packed structure of kernels.

О НОВОМ ПОДХОДЕ В МАТЕМАТИЧЕСКОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТИ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

А.С. Королев

ABOUT THE NEW APPROACH IN MATHEMATICAL PROGNOSTICATION OF WATER IMPERMEABILITY OF CEMENT COMPOSITES

A.S. Korolev

Работа посвящена раскрытию новой закономерности формирования водонепроницаемости структуры цементных композитов от основных факторов состава с учетом фактора неоднородности строения матричного компонента.

Ключевые слова: цементные композиты, водонепроницаемость, прогнозирование гидратной структуры, радиус макрокапилляров.

The article describes the new law of formation of water impermeability of cement composites structure depending on the main factors of composition with regard for heterogeneity of the matrix component structure.

Keywords: cement composites, water resistance, prognostication of hydrated structure, radius of macrocapillars.

В настоящее время в современном материаловедении не существует адекватных математических моделей прогнозирования водонепроницаемости цементных композитов, что содержит выработку обобщенных методов подбора составов цементных смесей с заданной водонепроницаемостью в различные сроки твердения.

По результатам ранее проведенных исследований были получены следующие результаты, яв-

ляющиеся основанием для моделирования водонепроницаемости бетона.

Система макрокапилляров цементных композитов непрерывна и является межкристаллитным образованием в структуре цементного камня. Фактическое строение макрокапилляров является четочным цилиндрическим, расчетное строение – цилиндрическое с приведенным гидравлическим радиусом (рис. 1).

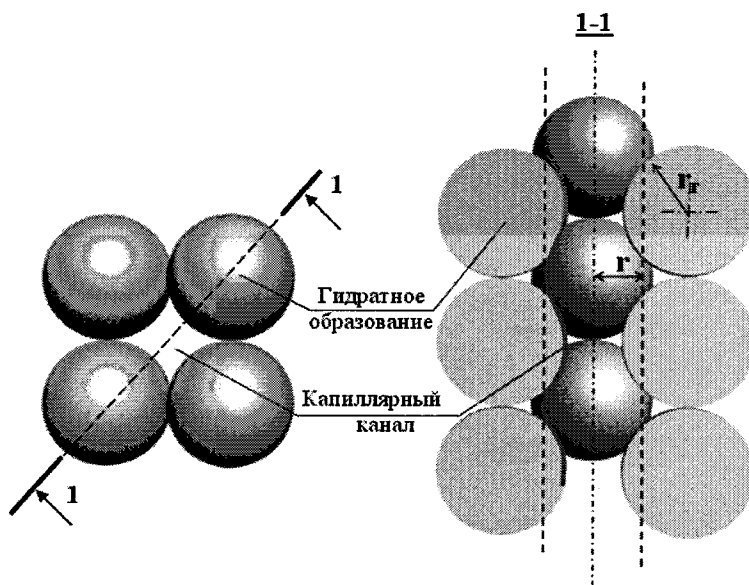


Рис. 1. Четочное строение макрокапилляра

Образование макрокапилляров обусловлено топологическими особенностями формирования гидратной структуры цементного камня:

- кристаллизацией гидратных новообразований вблизи поверхности цементного зерна с образованием микроскопических кластерных образований с упорядоченной структурой и неплотной упаковкой;

- наличием свободной влаги, заземленной между кристаллитными образованиями, не участвующей в гидратации цемента и разуплотняющей упаковку макрокопических гидратных образований;

- неплотностью гидратных микроскопических кластерных образований, которые являются субмикроструктурной фазой, содержащей микрокапиллярную и гелевую пористость, способную адсорбировать или физико-химически связывать свободную влагу.

Макрокапилляры обладают одним размерным порядком с кластерными гидратными образованиями цементного камня. Формирование структуры цементного камня в виде кластерных образований связано с накоплением продуктов гидратации в виде значительных субмикроструктурных образований размером более 10 мкм. Кристаллизация таких скоплений происходит на протяжении времени с поверхности вглубь с длительным сохранением определенного количества незакристаллизованной фазы. С этих позиций микропоры являются внутрикластерным образованием. Фактическое и расчетное строение субмикроструктурных кластерных образований – сферолиты с приведенным радиусом. На этом основании предложена *сферолитно-решеточная расчетная модель* структуры цементного камня (см. рис. 1).

Снижение влагопереноса по макрокапиллярам под действием капиллярных сил или гидростатического давления при уплотнении гидратной структуры связано с возрастанием вязкости воды в пристеночных слоях при уменьшении гидравлического радиуса макрокапилляров и, как следствие, увеличением силы трения о стенки капилляров. С этих позиций аналитически получен и экспериментально апробирован новый показатель водонепроницаемости цементных композитов – *удельное гидравлическое сопротивление* (t), зависящее от гидравлического радиуса макрокапилляров (r), поверхностного натяжения проникающей жидкости (σ) и угла смачивания проникающей жидкостью (θ) стенок капилляров.

$$t = \frac{2\sigma \cos \theta}{rh_0} \cdot 10^{-5}, \text{ ат/м.} \quad (1)$$

Критериями плотности структуры цементного камня являются: радиус макрокапилляров и геометрическая плотность. Радиус макрокапилляров – есть критериальная характеристика, объединяющая в себе несколько параметров структуры: объем макрокапиллярных пор, удельную поверхность

и плотность кристаллитных кластерных образований. Геометрическая или структурная плотность – отношение радиуса макрокопических кластерных гидратных образований и порядка структурной решетки.

Определена математическая взаимосвязь между гидравлическим радиусом макрокапилляров цементных композитов и показателями высоты капиллярного поднятия влаги

$$h_0 = 0,0394 \cdot 10^{12} r^2. \quad (2)$$

Таким образом, после подставления выражения высоты капиллярного поднятия и поверхностного натяжения воды получим

$$t = \frac{36,63}{r^3}, \quad (3)$$

r подставляется в мк.

Аналитически определена математическая зависимость между показателями макропористости и геометрической плотности цементных материалов, позволяющая оценивать размерный порядок гидратных кластерных образований в макроструктуре цементного камня.

$$\gamma = \frac{r_r}{r + r_r} = \cos \sqrt[3]{P}. \quad (4)$$

Для математического моделирования водонепроницаемости была предложена физическая модель выделенного макрокапилляра, согласно которой водонепроницаемость цементного композита равна водонепроницаемости одного выделенного в структуре макрокапилляра.

Для марочной водонепроницаемости:

$$W = t\delta - th_0 = t(0,15 - h_0), \quad (5)$$

где 0,15 – высота стандартного образца (м) при определении марки по водонепроницаемости.

$$W = \frac{36,63}{r^3} (0,15 - 0,04r^2), \quad (6)$$

r подставляется в мк.

Следовательно, основным показателем, определяющим водонепроницаемость цементных композитов, является гидравлический радиус макрокапиллярных пор.

Выразим радиус макрокапилляров r через показатель структурной плотности цементного камня по (4):

$$r = r_r \left(\frac{1}{\cos \sqrt[3]{P}} - 1 \right), \quad (7)$$

где r_r – средневзвешенный радиус гидратированных частиц цемента, примем данный радиус, равным радиусу исходных частиц цемента; P – макропористость цементного камня, по [1]

$$P = \frac{V/\Omega - 0,42\alpha}{0,32 + V/\Omega};$$

$$P = \frac{0,58V/\Omega - 0,12}{0,32 + V/\Omega}.$$

Результатом коррелирования зависимости (7)

с фактическими данными радиуса макрокапилляров, определенного по капиллярному поднятию влаги является зависимость

$$r = 7 \left(\frac{1}{\cos^3 \sqrt{P}} - 1 \right). \quad (8)$$

Данная зависимость (рис. 2) демонстрирует очень хорошую сходимость (коэффициент корреляции 0,98).

Заполнитель в цементных композитах способствует проявлению синергетического эффекта композиционного самоуплотнения – образованию структуры цементного камня с переменной пористостью в направлении от центра матричной прослойки к поверхности заполнителя, что способствует увеличению геометрической плотности и непроницаемости композита в целом при соблюдении определенных условий. Наблюдаемый эффект связан с поверхностными адсорбционными силами заполнителя, которые приводят к переменному распределению водосодержания по толщине матричной прослойки, поэтому механизм данного явления можно назвать гидравлическим самоуплотнением.

Переменность структуры матричного компонента приводит к интегральному эффекту повышения прочности и непроницаемости композита. Получена математическая зависимость прироста прочности и водонепроницаемости структуры от степени неравномерности распределения водосодержания по толщине матричной прослойки – функции поверхностного влияния заполнителя.

$$k_{гс} = \frac{k_{пс} (В/Ц - 0,2)^3}{(НГ - 0,2)^3}, \quad (9)$$

где коэффициент плотного слоя составляет

$$k_{пс} = 1 - \cos \left(1,57 \frac{НГ - 0,2}{В/Ц - 0,2} \right). \quad (10)$$

Гидравлическое самоуплотнение наиболее эффективно проявляется при В/Ц-отношениях менее критического значения, соответствующего вододерживающей способности композиционной сме-

си. Предложена математическая зависимость критического В/Ц от показателей водопотребности компонентов композитной смеси.

Повышение гидрофильности заполнителя и снижение водопотребности вяжущего при прочих равных условиях приводит к уплотнению структуры, т. е. повышению водонепроницаемости и прочности, что свидетельствует о положительном влиянии переменности матричного компонента на свойства композита.

Поэтому при расчете водонепроницаемости цементных композитов следует учитывать эффект гидравлического самоуплотнения.

$$W = k_{гс} \frac{36,63}{r^3} (0,15 - 0,04r^2), \quad (11)$$

где $k_{гс}$ – коэффициент гидравлического самоуплотнения, определяемый по выражению (9)

Проверка точности при определении водонепроницаемости бетонов (табл. 1) показала коэффициент корреляции 0,85, в 95 % случаев обеспечивается точность в пределах марки по водонепроницаемости. Зависимость водонепроницаемости бетона от В/Ц на Коркинском цементе представлена на рис. 3.

Таким образом, гидравлический механизм самоуплотнения может быть усилен путем введения поверхностно-активных веществ: при обработке поверхности заполнителя регуляторами смачивания и введении пластифицирующих добавок без снижения В/Ц бетонной смеси. Повышение гидрофильности зерен заполнителя улучшает прочностные показатели на 10...15 % и водонепроницаемость композита на 40...50 % при прочих равных условиях. Основным условием самоуплотнения при введении пластифицирующих добавок является сохранение подвижности бетонной смеси. В этом случае дополнительное синергетическое уплотнение позволяет повысить прочность на 10...15 % и водонепроницаемость в 2 и более раз.

Уровень прироста водонепроницаемости при введении пластификаторов определяется по (12)

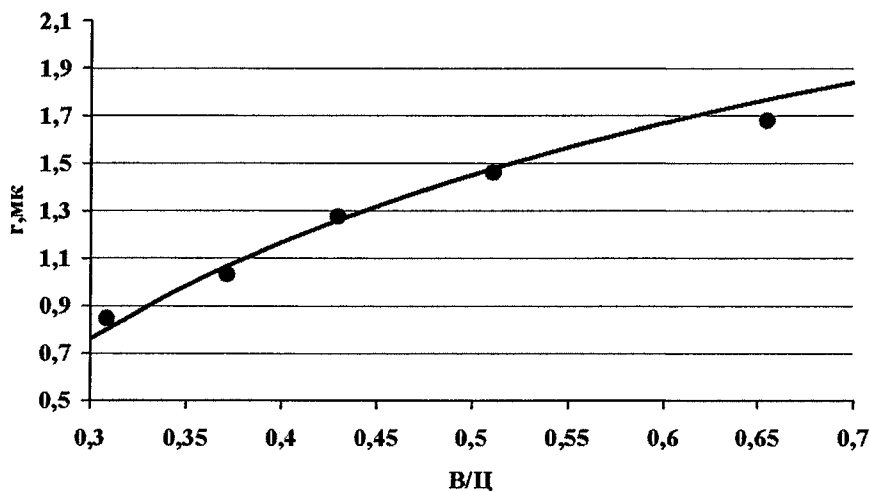


Рис. 2. Зависимость радиуса макрокапилляров цементного камня от В/Ц

Таблица 1

Завод-изготовитель	Марка цемента	В/Ц	НГ, %	Макропористость, P	Радиус макрокапилляров, r , мкм	Коеф. уплотненного слоя, $k_{пл}$	Коеф. гидравлич. самоуплотнения, $k_{гс}$	$W_{расч}$, ат	$W_{факт}$, ат	Отклонение от факт., %
Невьянский	ПЦ500Д0	0,36	25	0,13	1,02	0,12	3,87	14,24	13,50	5,4
		0,5		0,21	1,45	0,03	7,35	5,77	6,00	-3,8
		0,71		0,28	1,86	0,01	12,55	0,86	0,88	-2,6
	ПЦ400Д20	0,36	25	0,13	1,02	0,13	3,67	13,53	14,00	-3,4
		0,5		0,21	1,45	0,04	7,00	5,49	5,50	-0,2
		0,71		0,28	1,86	0,01	11,95	0,82	0,75	8,8
	ШПЦ400	0,36	25	0,13	1,02	0,10	4,31	15,88	14,50	9,5
		0,5		0,21	1,45	0,03	8,18	6,42	5,50	16,7
		0,71		0,28	1,86	0,01	13,95	0,95	0,85	12,1
Горнозаводский	ПЦ500Д0	0,35	28	0,12	0,99	0,29	2,34	9,97	11,20	-11,0
		0,5		0,21	1,45	0,08	4,87	3,82	5,70	-33,0
		0,71		0,28	1,86	0,03	8,34	0,57	0,64	-10,9
	ПЦ400Д20	0,36	29	0,13	1,02	0,33	2,19	8,06	8,00	0,7
		0,5		0,21	1,45	0,10	4,28	3,36	3,50	-4,1
		0,71		0,28	1,86	0,03	7,35	0,50	0,60	-16,3
Коркинский	ПЦ500Д0	0,36	25	0,13	1,02	0,12	3,87	14,24	12,90	10,4
		0,5		0,21	1,45	0,03	7,35	5,77	4,50	28,2
		0,71		0,28	1,86	0,01	12,55	0,86	0,80	7,2
	ПЦ400Д20	0,36	25	0,13	1,02	0,11	4,08	15,01	11,70	28,3
		0,5		0,21	1,45	0,03	7,74	6,08	5,80	4,8
		0,71		0,28	1,86	0,01	13,21	0,90	0,90	0,3
	ШПЦ400	0,36	26	0,13	1,02	0,17	3,19	11,76	10,80	8,9
		0,5		0,21	1,45	0,05	6,11	4,80	4,00	19,9
		0,71		0,28	1,86	0,02	10,45	0,71	0,65	9,8
Сухоложский	ПЦ500Д0	0,36	24	0,13	1,02	0,07	5,20	19,15	20,00	-4,3
		0,5		0,21	1,45	0,02	9,83	7,71	6,40	20,5
		0,71		0,28	1,86	0,01	16,74	1,14	1,10	4,0
	ПЦ400Д20	0,36	26	0,13	1,02	0,18	3,06	11,26	11,80	-4,6
		0,5		0,21	1,45	0,05	5,86	4,60	4,50	2,2
		0,71		0,28	1,86	0,02	10,03	0,69	0,70	-2,1
	ШПЦ400	0,36	31	0,13	1,02	0,51	1,67	6,15	6,50	-5,4
		0,5		0,21	1,45	0,15	3,35	2,63	2,50	5,1
		0,71		0,28	1,86	0,05	5,79	0,40	0,50	-20,8
Катав-Ивановский	ПЦ500Д0	0,36	25	0,13	1,02	0,12	3,87	14,24	13,50	5,4
		0,5		0,21	1,45	0,03	7,35	5,77	6,00	-3,8
		0,71		0,28	1,86	0,01	12,55	0,86	0,85	0,9
	ПЦ400Д20	0,36	25	0,13	1,02	0,13	3,67	13,53	12,10	11,8
		0,5		0,21	1,45	0,04	7,00	5,49	5,76	-4,7
		0,71		0,28	1,86	0,01	11,95	0,82	0,90	-9,3
	ШПЦ400	0,36	25	0,13	1,02	0,10	4,31	15,88	12,50	27,0
		0,5		0,21	1,45	0,03	8,18	6,42	6,80	-5,6
		0,71		0,28	1,86	0,01	13,95	0,95	1,10	-13,4

$$k_w = \frac{(НГ - 0,2)^3}{((1 - k_{ред}) НГ - 0,2)^3} \times \left(1 - \cos \left(1,57 \frac{(1 - k_{ред}) НГ - 0,2}{В/Ц - 0,2} \right) \right) \times \frac{1}{1 - \cos \left(1,57 \frac{НГ - 0,2}{В/Ц - 0,2} \right)}, \quad (12)$$

где $k_{ред}$ – водоредуцирование при введении пластификатора.

Проверка точности расчетного определения прироста водонепроницаемости бетонов при введении водоредуцирующих добавок ЛСТ и С-3. Коэффициент корреляции имеет невысокое значение 0,73, однако предложенная зависимость позволяет более чем в 80 % случаев прогнозировать водонепроницаемость пластифицированных бетонов с точностью до марки.

Для учета прироста водонепроницаемости при введении микродобавок применим зависимость (4)

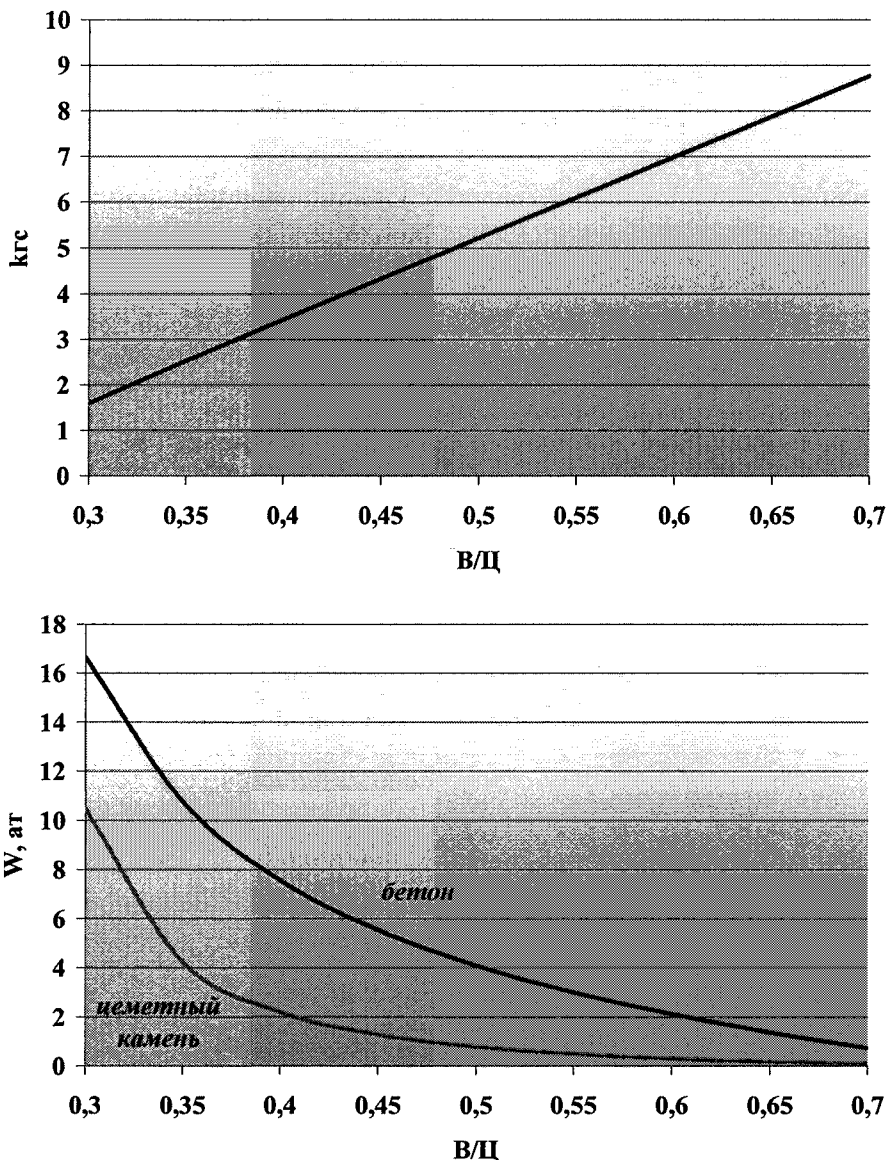


Рис. 3. Математическая модель водонепроницаемости (W, ат) бетона для ПЦ 400-Д20 Коркинского завода

$$r = r_r \left(\frac{1}{\cos \sqrt[3]{P}} - 1 \right)$$

с учетом повышения дисперсности гидратной структуры средневзвешенный радиус гидратного образования снижается по зависимости

$$k_r = \frac{m_b r_b + m_d r_d}{r_r} = \frac{(1 - m_d) r_r + m_d r_d}{r_r} = 1 - m_d \left(1 - \frac{r_d}{r_r} \right), \tag{13}$$

где m_b и m_d – массовые доли вяжущего и добавки; r_b и r_d – средневзвешенные радиусы частиц вяжущего и добавки. Тогда

$$r = k_r r_r \left(\frac{1}{\cos \sqrt[3]{P}} - 1 \right). \tag{14}$$

Прирост водонепроницаемости составит

$$k_W = \frac{1}{k_r^3}. \tag{15}$$

Например, для микродобавки с размером частиц 5 мкм и дозировкой 10 % от массы цемента

$$k_r = 1 - 0,1 \left(1 - \frac{2,5}{7} \right) = 0,94;$$

$$k_W = \frac{1}{0,94^3} = 1,2.$$

Для проверки зависимости был проведен эксперимент по введению в бетонную смесь с Ц/В = 2 на Коркинском ПЦ 400 Д-20 добавок с различными дозировками.

Результаты (табл. 2) показывают очень высокую сходимость фактических и расчетных приростов водонепроницаемости.

Таблица 2

Вид добавки	Дозировка, %	$r_{дв}$, МК	k_r	$W_{факт}$	Расч. k_W	Факт. k_W	Отклонение от факт., %
Fe ₂ O ₃	0		–	5,1	–	–	–
	10	2,5	0,94	6,3	1,20	1,24	–3,0
	20		0,87	8,2	1,52	1,62	–6,0
Метакаолин	0		–	5,6	–	–	–
	10	2,5	0,94	6,8	1,20	1,21	–0,3
	20		0,87	8,5	1,52	1,52	–
Тонкомолотый цемент	0		–	5,5	–	–	–
	10	4	0,96	6,0	1,13	1,09	3,4
	20		0,91	7,5	1,33	1,36	–2,2

Выводы

1. Разработан математический закон водонепроницаемости, учитывающий в качестве основных факторов: гидравлический радиус макрокапилляров и эффект гидравлического самоуплотнения гидратной структуры. Также учитывается дисперсность вяжущего, поверхностное натяжение проникающей жидкости и угол смачивания стенок капилляров проникающей жидкостью. Полученная зависимость позволяет на основе характеристик материалов и состава цементного композита точно рассчитывать марку по водонепроницаемости.

2. Предложены математические основы прогнозирования уплотняющего действия микро- и нанодобавок, изменяющих активность вяжущего, учитываемую при определении прироста прочности, и дисперсность гидратной структуры, учитываемую при определении прироста водонепроницаемости.

3. Разработанные математические модели позволяют регулировать свойства цементных композитов, исходя из заданных условий эксплуатации, а также использовать потенциал заполнителя и добавок в целях повышения эксплуатационных свойств. За счет управления адсорбционной способностью заполнителей, вяжущего и добавок возможно обеспечение прироста водонепроницаемости в 4...5 раз.

Литература

1. Состав, структура и свойства цементных бетонов / под ред. Г.И. Горчакова. – М.: Стройиздат, 1976. – 45 с.
2. Чеховский, Ю.В. Понижение проницаемости бетона / Ю.В. Чеховский. – М.: Энергия, 1968. – 192 с.

Поступила в редакцию 5 сентября 2008 г.

Королев Александр Сергеевич. К.т.н., доцент кафедры «Строительные материалы» ЮУрГУ.

Область научных интересов: принципы направленного формирования структуры цементных композитов.

Alexander S. Korolev. Candidate of technical science, associate professor of the Structural Materials department of South Ural State University.

Scientific interests: principles of directional structure formation of cement composites.

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ В ТЕХНОЛОГИИ ЖАРОСТОЙКОГО БЕТОНА

В.А. Абызов

CHOICE OF RATIONAL APPLICATION DOMAINS OF INDUSTRIAL WASTE IN THE REFRACT CONCRETE TECHNOLOGY

V.A. Abyzov

В работе сформулированы требования к промышленным отходам, пригодным для использования в технологии жаростойкого бетона. Предложена их классификация, облегчающая выбор оптимальных областей применения.

Ключевые слова: жаростойкие бетоны, огнеупоры, промышленные отходы, классификация.

The article settles the requirements to the industrial waste suitable for usage in the heat-resistant concrete technology. The classification easing the choice of optimal application domains is given.

Keywords: refract concretes, refractories, industrial waste, classification.

Эффективной разновидностью материалов, предназначенных для эксплуатации в области высоких температур, являются жаростойкие бетоны. Применение их вместо штучных огнеупоров снижает трудозатраты, уменьшает сроки строительства, позволяет быстро изготавливать изделия любой формы, зачастую повышает долговечность футеровки. В отличие от традиционных огнеупоров бетоны не требуют обжига. Производство изделий из жаростойкого бетона проще и более гибкое, чем штучных огнеупоров. Соответственно, в общем объеме огнеупоров доля бетонов и «неформованных огнеупоров» неуклонно увеличивается с 1970-х гг., как в нашей стране, так и за рубежом.

По ряду причин, в нашей стране всегда широко использовались заполнители и компоненты вяжущего из промышленных отходов. Это бой вторичных огнеупоров, некоторые шлаки, дисперсные отходы абразивных и ряда химических производств и т. д. В результате снижалась стоимость материалов. Попутно решали проблему утилизации промышленных отходов. В то же время, в Европе и США делается акцент на качестве материалов, поэтому широко используются чистые компоненты. Так, до настоящего времени в США практически не перерабатываются вторичные огнеупоры.

Ввиду многообразия промышленных отходов, пригодных для использования в технологии жаростойкого бетона, нормативная литература отражает, как правило, лишь общие требования к некоторым из них (содержание вредных примесей, химический состав, огнеупорность). Это усложняет для потенциальных потребителей выбор оптимальных

областей применения огнеупорных промышленных отходов [1].

Вначале необходимо сформулировать общие требования к промышленным отходам, используемым в технологии жаростойкого бетона [2, 3]. К таковым следует отнести:

1. Преобладание компонентов, обеспечивающих формирование огнеупорных соединений или содержащие их (Al_2O_3 , Cr_2O_3 , TiO_2 , шпинели, форстерит, SiC и др.):

– глиноземистые отходы, обеспечивающие высокую температуру применения, хорошо сочетаются с алуминатными цементами и фосфатными вяжущими (шлаки выплавки вторичного алюминия, отходы производств корунда, катализаторов, отработанные катализаторы, шламы водоподготовки и т. д.);

– хромглиноземистые отходы, обеспечивающие формирование стабильных фосфатов при невысоких температурах (феррохромовые шлаки, отходы производств катализаторов, шламы абразивной обработки, травления и т. д.);

– отходы, содержащие свободную двуокись титана, что обеспечивает быструю кристаллизацию фосфатов (шламы, отходы пигментных производств, производства титанистого корунда и т. д.);

– отходы, содержащие карбид кремния (бой тиглей, нагревателей, отходы производства абразивов, карбида кремния);

– корундовые и шпинелидные отходы (шлаки аллюминотремических производств, отходы производства корунда и т. д.);

– отходы, содержащие примеси свободных Fe_2O_3 , CaO, MgO, R_2O . В малых количествах спо-

собствуют интенсивному набору прочности и тепловыделению в фосфатных бетонах (шлаки выплавки вторичного алюминия, отходы, богатые алюминатами кальция и т. д.).

– алюмосиликатные отходы, обладающие активностью по отношению к фосфатному связующему (отходы производства шамота, вторичный шамот и т. д.);

– алюмокальциевые шлаки ферросплавных производств, представляющие собой клинкер алюминатных цементов;

2. Фазовый состав:

– отходы с преобладанием соединений в активной форме – компоненты вяжущего (отходы химических производств, катализаторов, отработанных катализаторов, травильных производств и т. д.);

– отходы с преобладанием закристаллизованных соединений – для заполнителей (феррохромовые шлаки, отходы корундовых производств, шлаки алюминотермических производств и т. д.).

3. Фракционный состав отходов, позволяющий снизить затраты на измельчение:

– дисперсные отходы как компонент вяжущего или тонкомолотая добавка (пыли, шламы, отработанные катализаторы и т. д.) [7];

– кусковые материалы (шлаки, вторичные огнеупоры), пригодные для использования в качестве заполнителя.

Существующие классификации побочных продуктов промышленности обычно отражают только химический состав и генезис. Так как промышленные отходы имеют сложный состав, применить классификацию по химсоставу, подобную принятой для огнеупоров, возможно только для вторичных огнеупоров. Применительно к остальным видам отходов допустимо говорить лишь качественно о содержании каких-либо соединений в значимых количествах.

Определение рациональных областей применения отходов в технологии жаростойкого бетона требует иных принципов систематизации. Необходимо сгруппировать материалы с точки зрения общих свойств, значимых для технологии [4, 5]. Такowymi свойствами являются:

– дисперсность;

– химический состав;

– фазовый состав, отражающий химическую активность по отношению к затворителям и вяжущим.

Оптимальная последовательность классификации: фракционный состав – фазовый состав – химический состав (по важнейшим огнеупорным оксидам, характерным химическим соединениям или вредным примесям). Промышленные отходы, используемые как компоненты жаростойких бетонов на портландцементе, здесь не рассматриваются, так как этот вопрос подробно освещен в литературе. Предложенная ниже классификация отражает наиболее целесообразные области применения побочных продуктов промышленности в вяжущих и бетонах на жидком стекле, глиноземе (ГЦ) и высокоглиноземистом (ВГЦ) цементе, магнезиальном вяжущем, а также фосфатных

связках (ФС) – всех видах вяжущих, широко используемых для жаростойких бетонов.

А. Дисперсные промышленные отходы, содержащие металлический алюминий. Шлаки алюминиевой промышленности и т. д. – газообразователь для ячеистых бетонов; экзотермическая добавка, обеспечивающая твердение бетонов на ФС; сырье для ФС.

Б. Дисперсные отходы, содержащие огнеупорные соединения, пригодные для использования в составе вяжущего или тонкомолотой добавки [2, 3].

1. Содержащие свободные оксиды металлов.

1.1. Содержащие Al_2O_3 . Отработанные катализаторы нефтехимических производств, отсеvy носителя катализатора дегидрирования углеводородов для нефтехимической промышленности, отработанные сорбенты водоподготовки, пыли и шламы абразивных производств и т. д.

1.1.1. Высокоактивные, содержащие термоактивированный глинозем, способные к гидратации и ранним твердофазным реакциям при обжиге. В процессе спекания – шпинелеобразующий компонент, добавка в высокоглиноземистые вяжущие, бетоны на ФС, сырье для ФС.

1.1.2. Малоактивные, содержащие глинозем. Повышают температуру применения. В процессе спекания – шпинелеобразующий компонент, добавка в бетоны на ГЦ, ВГЦ, компонент ФС.

1.1.3. Инертные, содержащие $\alpha-Al_2O_3$. Повышают температуру применения бетонов. В процессе спекания – шпинелеобразующий компонент, заполнитель в бетоны на ВГЦ, ФС.

1.2. Содержащие Cr_2O_3 . Травильные шламы, отработанные катализаторы. Добавки в бетоны на ФС, сырье для ФС. Снижают температуру образования стабильных фосфатов, повышают температуру применения и прочность бетонов на ФС. В процессе спекания – шпинелеобразующий компонент.

1.3. Содержащие TiO_2 . Отходы производства пигментов. Добавки в бетоны на ФС, ускоряют кристаллизацию фосфатов, повышают огнеупорность.

1.4. Содержащие оксиды железа. Пиритные огарки – компонент бетонов на ФС, твердеющих без применения сушки.

1.5. Содержащие MgO.

1.5.1. Содержащие активный MgO. Пыли газоочистки огнеупорных производств. При неполном связывании могут вызывать разрушение бетонов. Вяжущее для магнезиальных бетонов.

1.5.2. Содержащие MgO в форме периклаза. Сырье для ФС, компонент ФС, заполнитель в магнезиальных бетонах.

1.6. Содержащие шпинели. Пыли огнеупорных производств – огнеупорный заполнитель в бетонах на ГЦ, ВГЦ, ФС.

1.7. Содержащие алюмосиликаты. Отходы при производстве муллита, шамотных и пиррофилитовых изделий. Активны по отношению к ФС, огнеупорный заполнитель в бетонах на ГЦ, ВГЦ, ФС.

1.8. Содержащие некоторые силикаты кальция, например $\gamma-C_2S$. Самораспадающиеся стале-

плавильные шлаки, нефелиновые шламы, являются отвердителем для бетонов на жидком стекле.

1.9. Содержащие гидроксиды трехвалентных металлов Cr^{3+} , Al^{3+} , Fe^{3+} (шламы травильных и химических производств). Применение: компонент вяжущего в бетонах на ФС [8].

1.10. Содержащие карбид кремния. Применение: наполнитель, повышающий термическую стойкость и огнеупорность.

1.11. Содержащие малые количества свободных CaO , MgO , R_2O в сочетании со значительными количествами огнеупорных соединений (Al_2O_3 , Cr_2O_3 , шпинели и др.). Снижают температуру твердения, способствуют экзотермии в процессе твердения, ускоряют набор прочности в бетонах на ФС.

1.12. Содержащие продукты полной или частичной дегидратации гидроаломосиликатов (огнеупорных глин). Пыли газоочистки шамотных производств – компонент ФС.

В. Кусковые материалы (шлаки, вторичные огнеупоры).

1. Содержащие химически активные соединения. Целесообразно использовать после помола как компонент вяжущего.

1.1. Содержащие алюминаты кальция (CA , CA_2 , C_{12}A_7). Шлаки алюминотермического производства, шлаки ферросплавных производств. После помола могут использоваться как вяжущие, а также в сочетании с ГЦ и ВГЦ.

1.2. Содержащие хромглиноземистые соединения и небольшие количества алюминатов кальция. Шлаки алюминотермических производств. После помола – компонент вяжущего в бетонах на ФС [8].

1.3. Содержащие оксиды железа. Пиритные огарки – компонент ФС, твердеющих при нормальных температурах (без сушки).

2. Содержащие закристаллизованные, стабильные соединения. Пригодны для использования только в качестве наполнителей.

2.1. Корундовые и шпинелидные отходы (шлаки алюминотермических производств, отходы производства корунда и т. д.).

2.2. Аломосиликатные отходы (вторичные шамотные и пиррофиллитовые огнеупоры).

2.3. Хромглиноземистые отходы (феррохромовые шлаки). Заполнитель в бетонах на ВГЦ, хорошо сочетаются с ФС.

2.4. Карбидкремниевые отходы (бой тиглей, нагревателей, отходы абразивных производств). Заполнитель, повышающий термическую стойкость.

2.5. Содержащие форстерит (бой форстеритовой керамики). Заполнитель, повышающий термическую стойкость.

Подобная классификация упрощает выбор оптимальных областей применения промышленных отходов, пригодных для использования в производстве жаростойкого бетона, позволит выработать единый подход к их использованию.

Литература

1. Абызов, В.А. Основные направления повышения качества и расширения номенклатуры жаростойких растворов и огнеупорных клеев / В.А. Абызов, О.А. Клинов, Е.Н. Ряховский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2007. – Вып. 4. – № 14(86) – С. 12–14.

2. Абызов, А.Н. Получение поризованных жаростойких фосфатных материалов методом самораспространяющегося экзотермического синтеза / А.Н. Абызов // Всесоюз. совещ. «Высокотемпературная химия силикатов и оксидов»: тез. докл. – Л.: Наука, 1988. – С. 399–401.

3. Абызов, В.А. Жаростойкий газобетон на основе алюмомагнийфосфатного связующего и высокоглиноземистых промышленных отходов / В.А. Абызов // Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь: ПГТУ, 2000. – 21 с.

4. Абызов, В.А. Ячеистые жаростойкие материалы на основе промышленных отходов / В.А. Абызов // Строительство и образование: сб. науч. тр. – Екатеринбург: УГТУ, 2001. – Вып. 4. – С. 123–124.

5. Жаростойкий газобетон на алюмоборфосфатном связующем / В.А. Абызов, А.Н. Абызов, В.А. Магилат и др. // Строительные материалы и изделия: межвузовский сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2002. – С. 143–148.

6. Хлыстов, А.И. Теоретические и технологические принципы повышения долговечности огнеупорных футеровочных материалов / А.И. Хлыстов // Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Самара: СГАСУ, 2004. – 36 с.

7. Абызов, А.Н. Жаростойкие бетоны с добавками отходов производства носителя катализатора дегидрирования углеводородов / А.Н. Абызов, В.А. Абызов, А.К. Абрамов // Строительные материалы. – 2007. – № 4. – С. 84–85.

8. Абызов, В.А. Разработка и опыт применения огнеупорного клея на фосфатных связующих // В.А. Абызов, Е.Н. Ряховский // Огнеупоры и техническая керамика. – 2007. – № 11. – С. 28–30.

Поступила в редакцию 23 сентября 2008 г.

Абызов Виктор Александрович. Доцент кафедры «Строительные материалы» ЮУрГУ. Тел. 267 94 72. E-mail: uralniist@mail.ru.

Область научных интересов: жаростойкие бетоны, фосфатные материалы, высокотемпературная теплоизоляция, жаростойкие материалы на основе отходов промышленности.

Abyzov Viktor Alexandrovich. Associate professor of the Constructional Materials department of South Ural State University. Telephone: +7 (351) 267 94 72. E-mail: uralniist@mail.ru.

Scientific interests: principles of directional structure formation of cement composites.

Инженерное оборудование зданий и сооружений

УДК 622.692.4

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОПРОВОДАХ

В.И. Панферов, А.А. Февралёв

NUMERICAL SIMULATION OF THE TRANSITIONAL PROCESSES IN THE GAS PIPELINES

V.I. Panferov, A.A. Fevralev

Разработана численная модель течения газа с дозвуковой скоростью по трубопроводам. Создан программный комплекс, позволяющий исследовать переходные процессы в газопроводах, обусловленные различными эксплуатационными ситуациями в системах газоснабжения, в частности, явление газодинамического удара.

Ключевые слова: конечно-разностная схема; газопровод; изменение давления; программная реализация.

The numerical model of the gas flow with subsonic speed in the pipelines was developed. The special program was created, which makes it possible to investigate transient processes in the gas pipelines, the caused by different operational situations in the systems gas supplies, in particular, the phenomenon of the dynamical gas impact.

Keywords: finite-difference diagram; gas pipeline; change in the pressure; program realization.

Данное исследование является продолжением работы [1], в которой рассматривались переходные процессы, возникающие в газопроводах при конкретных эксплуатационных ситуациях. Методом Фурье были решены аналитически основные дифференциальные уравнения, описывающие процесс, но только для некоторых предельных случаев. Решение данных уравнений для наиболее общей ситуации возможно только численными методами, данная задача рассматривается в настоящей работе.

Известно [1–6], что нестационарное движение газа с дозвуковой скоростью в длинных трубопроводах может быть описано следующей системой дифференциальных уравнений в частных производных.

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\lambda\rho\omega^2}{2d}, & 0 < x < L, t > 0; \\ \frac{\partial P}{\partial t} = c^2 \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial x}, & 0 < x < L, t > 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $P(x,t)$, $\rho(x,t)$, $w(x,t)$ – соответственно давление, плотность и скорость течения газа в точке x по длине газопровода в момент времени t ; λ – коэффициент гидравлического трения; d – внут-

ренний диаметр газопровода; c – скорость звука в газе; L – длина рассматриваемого участка газопровода.

К системе (1) следует добавить уравнение состояния реального газа, которое представляется уравнением Клапейрона с поправочным коэффициентом [7].

Движение газа считается изотермическим, так как постоянная времени тепловых переходных процессов в десятки раз больше постоянной времени гидравлических процессов.

Таким образом, получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\lambda}{2d} \frac{ZRT}{P} (\rho\omega)^2; \\ \frac{\partial P}{\partial t} = c^2 \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial x}, \end{cases} \quad (2)$$

где Z – поправочный коэффициент для реального газа; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура газа.

Введем дополнительную переменную $Q = \rho\omega$, физический смысл данной переменной – это массовый расход газа, приходящийся на единицу площади поперечного сечения.

Тогда систему (2) запишем следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial P(x,t)}{\partial x} = \frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} + \frac{\lambda}{2d} \frac{gRT}{P(x,t)} Q(x,t)^2; \\ \frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = c^2 \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x}. \end{cases} \quad (3)$$

При моделировании учитывалось, что коэффициент λ величина не постоянная, а зависит от скорости движения потока (Re – число Рейнольдса). Использовались следующие формулы, рекомендуемые [8] для определения коэффициента трения:

- 1) при $Re < 2000$ $\lambda = 64 / Re$;
- 2) при $2000 < Re < 4000$ $\lambda = 0,0025 \sqrt[3]{Re}$;
- 3) при $Re > 4000$ $\lambda = 0,11 \left(\frac{K_s}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$.

Здесь K_s – коэффициент эквивалентной шероховатости.

Рассмотрим сначала следующую задачу: в начале участка давление газа поддерживается автоматическим регулятором на одном и том же уровне P_0 , а в конце этого участка регулирующий клапан мгновенно закрывается. Математическая формулировка данной задачи такова:

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial P(x,t)}{\partial x} + \frac{\lambda}{2d} \frac{gRT}{P(x,t)} Q(x,t)^2 = 0; \quad (4)$$

$0 < x < L, t > 0;$

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} + c^2 \frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} = 0, \quad 0 < x < L, t > 0; \quad (5)$$

$$P(x,0) = f(x), \quad 0 \leq x \leq L; \quad (6)$$

$$Q(x,0) = f(x), \quad 0 \leq x \leq L; \quad (7)$$

$$P(0,t) = P_0 = \text{const}, \quad t > 0; \quad (8)$$

$$\frac{\partial Q(0,t)}{\partial x} = 0, \quad t > 0; \quad (9)$$

$$\frac{\partial P(L,t)}{\partial x} = 0, \quad t > 0; \quad (10)$$

$$Q(L,t) = 0, \quad t > 0. \quad (11)$$

Уравнения (8) и (9) задают условия в начале трубопровода, возникающие из-за наличия регуля-

тора, поддерживающего давление на заданном уровне. Граничные условия (10) и (11) для конечной точки трубопровода – это резкое закрытие задвижки и отсутствие расхода в этой точке.

Для численного решения задачи построим пространственно-временную область $\{0 < x < L, t > 0\}$ сеткой, образуемой прямыми:

$$x = i \cdot \Delta x, \quad i = \overline{0, n}, \quad n = \frac{L}{\Delta x};$$

$$y = k \cdot \Delta t, \quad k = \overline{0, n}.$$

Здесь Δx и Δt – размеры шагов по длине газопровода и времени.

Далее заменим частные производные следующими конечными разностями:

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} \approx \frac{P(x,t+\Delta t) - P(x,t)}{\Delta t};$$

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} \approx \frac{Q(x,t+\Delta t) - Q(x,t)}{\Delta t};$$

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial x} \approx \frac{P(x+\Delta x,t) - P(x,t)}{\Delta x};$$

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial x} \approx \frac{Q(x,t) - Q(x-\Delta x,t)}{\Delta x}.$$

Таким образом, для решения данной задачи использовали смешанную конечно-разностную схему, которая в данном случае показала наилучшие практические результаты (рис. 1).

В результате для уравнений (4) и (5) получим следующие конечно-разностные аппроксимации:

$$\frac{Q(x,t+\Delta t) - Q(x,t)}{\Delta t} + \frac{P(x+\Delta x,t) - P(x,t)}{\Delta x} + \frac{\lambda}{2d} \frac{gRT}{P} Q(x,t)^2 = 0; \quad (12)$$

$$\frac{P(x,t+\Delta t) - P(x,t)}{\Delta t} + c^2 \frac{Q(x+\Delta x,t) - Q(x,t)}{\Delta x} = 0. \quad (13)$$

Для удобства записи, введем следующие обозначения:

$$x = i \cdot \Delta x, \quad t = k \cdot \Delta t, \\ f(x,t) = f(i \cdot \Delta x, k \cdot \Delta t) = f_{i,k}.$$

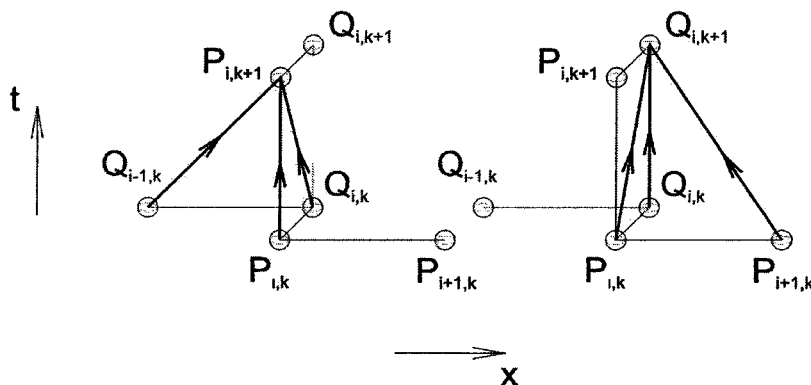


Рис. 1. Используемая разностная схема

Инженерное оборудование зданий и сооружений

Тогда уравнения (12) и (13) примут следующий вид:

$$\frac{Q_{i,k+1} - Q_{i,k}}{\Delta t} + \frac{P_{i+1,k} - P_{i,k}}{\Delta x} + \frac{\lambda}{2d} \frac{gRT}{P_{i,k}} Q_{i,k}^2; \quad (14)$$

$$\frac{P_{i,k+1} - P_{i,k}}{\Delta t} + c^2 \frac{Q_{i,k} - Q_{i-1,k}}{\Delta x} = 0. \quad (15)$$

Далее, получим уравнения для определения P и Q , на $(k+1)$ -м временном слое, при всех известных точках на k -м временном слое.

$$Q_{i,k+1} = Q_{i,k} + \Delta t \left(\frac{P_{i+1,k} - P_{i,k}}{\Delta x} + \frac{\lambda}{2d} \frac{gRT}{P_{i,k}} Q_{i,k}^2 \right); \quad (16)$$

$$P_{i,k+1} = P_{i,k} - \frac{c^2 \cdot \Delta t}{\Delta x} (Q_{i,k} - Q_{i-1,k}). \quad (17)$$

Следовательно, по данным k -го временного слоя можно определить P и Q на $(k+1)$ -м слое.

Аппроксимируем граничные условия в начале и конце трубопровода (8)–(11):

$$P(0,t) = P_0 = \text{const} \Rightarrow P_{0,k} = \text{const};$$

$$\frac{\partial Q(0,t)}{\partial x} = 0 \Rightarrow \frac{Q_{+1,k} - Q_{-1,k}}{2\Delta x} = 0 \Rightarrow Q_{+1,k} = Q_{-1,k};$$

$$\frac{\partial P(L,t)}{\partial x} = 0 \Rightarrow \frac{P_{n+1,k} - P_{n-1,k}}{2\Delta x} = 0 \Rightarrow P_{n+1,k} = P_{n-1,k};$$

$$Q(L,t) = 0 \Rightarrow Q_{n,k} = 0.$$

Для компьютерной реализации вышеприведенных соотношений разработали специальный программный комплекс со следующими особенностями. При расчётах в памяти хранится информация только о k -м и $(k+1)$ -м временных слоях. При переходе на следующий шаг по времени данные ячеек с $(k+1)$ -го слоя переписываются в k -й слой и вычисления повторяются. Данный приём позволяет значительно сократить объем занимаемой оперативной памяти (т. е. в памяти задействованы

только $2n$ ячеек), что позволяет существенно увеличить скорость расчётов. Результаты, полученные в каждой итерации, в тот же момент отображаются на строящихся графиках, что делает данную программу максимально динамичной, удобной при использовании, наглядной и понятной пользователю.

Явление гидродинамического удара для несжимаемой жидкости достаточно подробно изучено Н.Е. Жуковским и его учениками. В системах газоснабжения транспортируемый газ никаким образом не может быть отнесен к несжимаемой жидкости. Поэтому в случае с газом будут иметь место несколько другие процессы. Выясним с помощью разработанного программного комплекса случай с газодинамическим ударом, т. е. ситуацию при резком закрытии задвижки в конце газопровода. Давление в начале магистрали в любой момент времени $P(0,t) = 0,6$ МПа, считаем, что оно поддерживается на заданном уровне регулятором давления. В конце магистрали перед задвижкой в начальный момент времени давление равняется $P(L,0) = 0,57$ МПа (учитывая потери давления на трение).

Результаты моделирования данной задачи представлены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что скачок давления при резком закрытии задвижки не превышает 0,62 МПа, т. е. давление повышается не более чем на 10 % от стационарного значения.

При проведении ремонтных работ на ГРС вследствие неправильных действий обслуживающего персонала возможен проскок кратковременного импульса высокого давления через байпасную линию.

Настроим математическую модель на следующие граничные условия. В начале трубопровода треугольный импульс давления, т. е. $P(0,t) = f(t)$ –

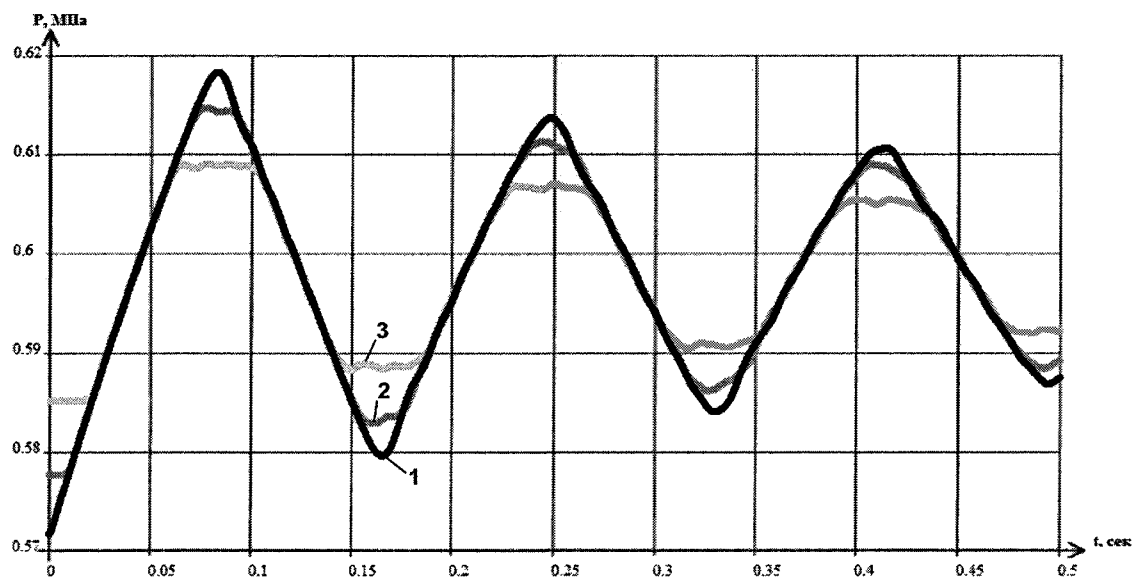


Рис. 2. Кривые изменения давления при резком закрытии задвижки: 1 – давление в конце газопровода; 2 – давление в точке 0,75 длины газопровода; 3 – давление в середине газопровода

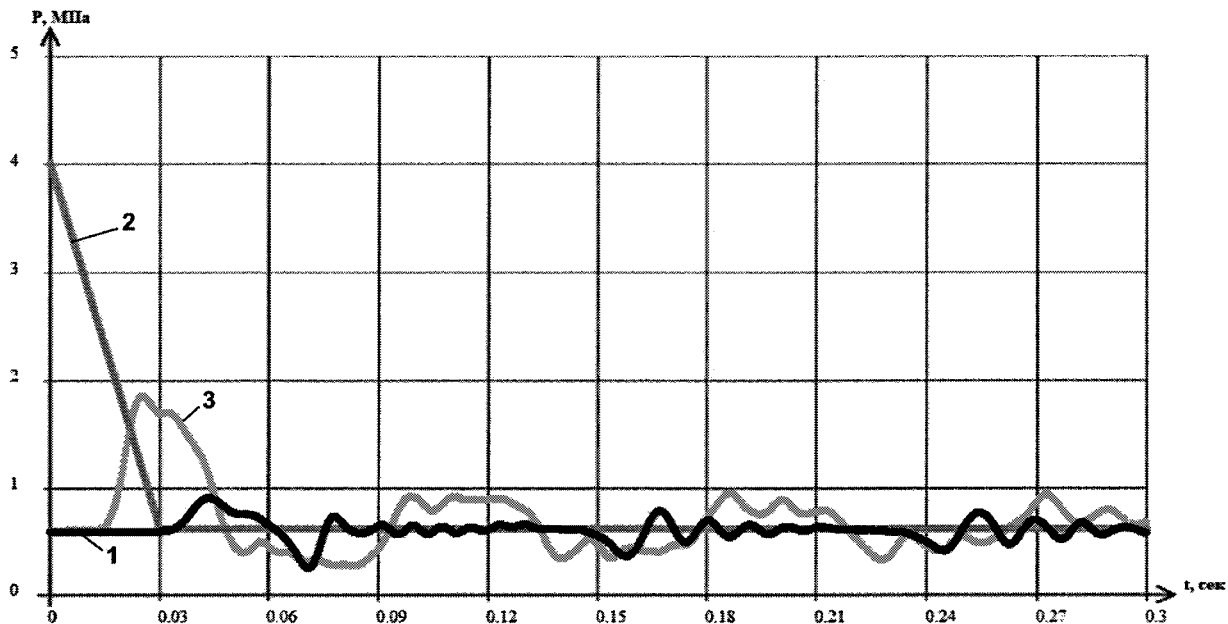


Рис. 3. График изменения давления при кратковременном импульсе высокого давления: 1 – давление в конце газопровода; 2 – давление в начале газопровода; 3 – давление в середине газопровода

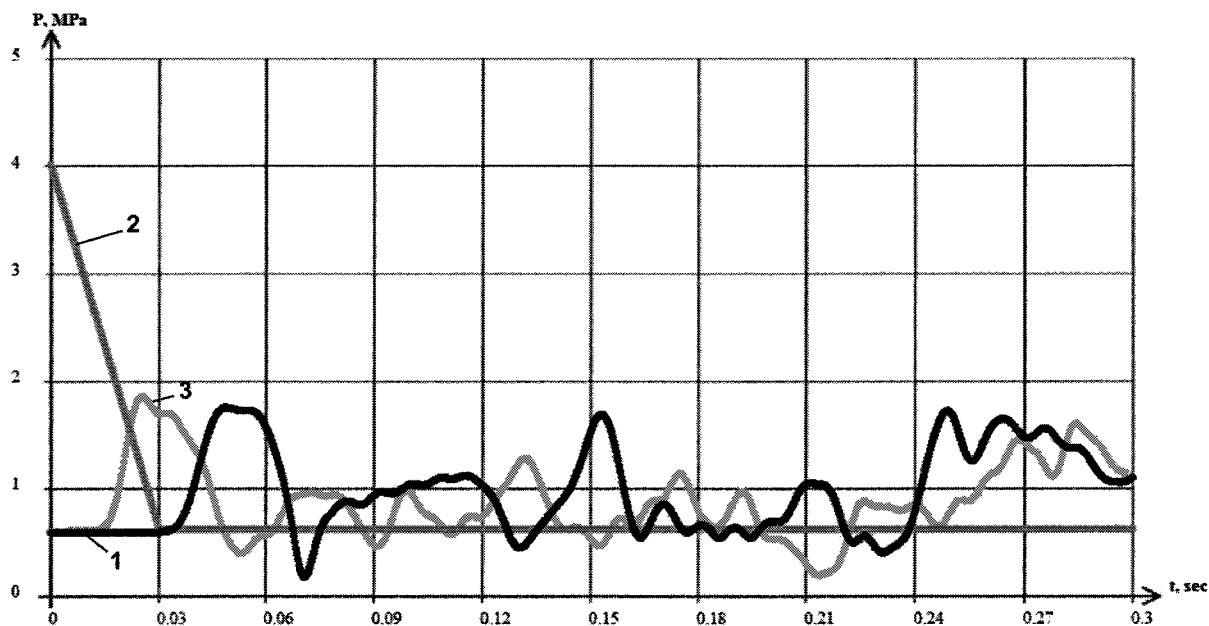


Рис. 4. График изменения давления при совместном влиянии двух факторов: 1 – давление в конце газопровода; 2 – давление в начале газопровода; 3 – давление в середине газопровода

уменьшается от 4 МПа, до 0,6 МПа с каждым шагом по времени. В конце трубопровода, установлен регулятор давления, поддерживающий давление на уровне, $P(L, t) = 0,57$ МПа.

Решая поставленную задачу, с помощью разработанной программы, получили следующие результаты (рис. 3).

Из графика видно, что проскок импульса высокого давления вызывает крайне нестационарный процесс, однако амплитуда колебаний относительно невелика, и колебания достаточно быстро затухают.

Теперь рассмотрим совместное влияние двух факторов – это кратковременный импульс высокого давления через байпас, далее при повышении давления в конце магистрали выше 0,6 МПа автоматически резко закрывается заслонка, установленная в данной точке газопровода. Результаты численного эксперимента приведены на рис. 4.

Данные результаты показывают, что совместное влияние этих двух факторов приводит к катастрофическим последствиям.

Полученные результаты достаточно важны для практики, потому что в настоящее время перед

ГРУ или ГРП обычно устанавливается автоматическая заслонка, закрывающаяся при повышении давления. В этом случае для предотвращения вышеописанной аварийной ситуации необходимо предусмотреть специальные устройства.

Литература

1. Панферов, В.И. Моделирование нестационарных процессов в газопроводах / В.И. Панферов, С.В. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2007. – Вып 4. – № 14. – С. 44–47.

2. Чарный, И.А. Основы газовой динамики / И.А. Чарный. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – 196 с.

3. Галиуллин, З.Т. Интенсификация магистрального транспорта газа / З.Т. Галиуллин, Е.В. Леонтьев. – М.: Недра, 1991. – 272 с.

4. Баясанов, Д.Б. Автоматизированные системы

управления трубопроводными объектами коммунального хозяйства / Д.Б. Баясанов. – М.: Стройиздат, 1974. – 312 с.

5. Юсубов, Ч.А. Численное определение нестационарных процессов в магистральных газопроводах / Ч.А. Юсубов // Проблемы энергетики. – 2003. – № 2. – С. 62–65.

6. Поляков, Г.Н. Моделирование и управление газотранспортными системами / Г.Н. Поляков, Е.И. Яковлев, А.С. Пиотровский. – СПб.: Недра, 1992. – 256 с.

7. Бобровский, С.А. Гидравлический расчет распределительных трубопроводов / С.А. Бобровский. – М.: Стройиздат, 1968. – 159 с.

8. СП 42-101-2003 «Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб». – М.: ЗАО «Полимергаз», 2003. – 174 с.

Поступила в редакцию 15 сентября 2008 г.

Панферов Владимир Иванович. Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение и вентиляция» ЮУрГУ.

Область научных интересов: моделирование и оптимизация теплотехнических процессов и систем, автоматизация технологических объектов.

Vladimir I. Panferov. Doctor of technical science, professor, head of the Heat and Gas Supply and Ventilation department of South Ural State University in 2008.

Scientific interests: simulation and optimization of heat engineering processes and systems, automation of technological objects.

Февралёв Алексей Андреевич. Инженер, выпускник кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция» ЮУрГУ 2008 года.

Область научных интересов: компьютерное моделирование процессов в системах теплогазоснабжения и вентиляции.

Alexey A. Fevraleyev. Engineer, graduated from the Heat and Gas Supply and Ventilation department of South Ural State University in 2008.

Scientific interests: computer simulation of processes in the systems of heat and gas supply and ventilation.

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПЛАНОВОЙ КОРРЕКТИРОВКИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОТПУСКА ТЕПЛОТЫ ПО ДАННЫМ КОНТРОЛЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА СИСТЕМ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Ю.Н. Денисенко

ABOUT PROCESSES OPTIMIZATION OF THE SCHEDULED CORRECTION OF THE HEAT SUPPLY REGULATION ACCORDING TO THE DATA OF CONTROL OF CONSUMERS SYSTEMS' THERMAL CONDITIONS

Y.N. Denisenko

На основе универсальной модели системы отопления, разработан алгоритм неадаптивной и адаптивной настройки. Найден оптимальный параметр, описывающий работу системы отопления и рассмотрены способы его идентификации. Предложен подход к оптимизации функционирования основных звеньев СЦТ посредством построения корректных графиков регулирования. Представлена качественная оценка результатов.

Ключевые слова: оптимизация теплового режима, график регулирования, модель системы отопления, алгоритмы параметрической идентификации.

On the basis of the general model of the heating system the author elaborates the algorithm of non-adaptive and adaptive tuning. The author calculates the optimal parameter showing the heating system operation and gives variants of its identification. The author offers the approach to optimization of functioning of the main links of the district heating system by constructing the correct graphs of regulation. Quality assessment of the results is presented.

Keywords: optimization of thermal conditions, graph of regulation, model of heating system, algorithms of parametric identification.

Анализ работы систем централизованного теплоснабжения (СЦТ) выявляет их плохую управляемость из-за отсутствия новых алгоритмов и методов оптимизации. Несмотря на кажущуюся «прозрачность» последних, искомые мероприятия в технике теплоснабжения сводятся лишь к «индивидуальному» контролю тепла – без обратной связи, и, только в редких случаях, например, при переходе к полной децентрализации, возможно проведение мероприятий, реализующих общие алгоритмы регулирования.

Процесс управления СЦТ предлагается представлять в виде указанной на рис. 1 схемы, для которой основополагающим является построение алгоритма управления (АУ) системой отопления здания (1-й АУ), который и будет организовывать работу оборудования ИТП. После чего информация (из характерных точек A_1, \dots, A_n), подвергнутая обработке 2-м АУ, будет организовывать работу ЦТП и т. д. В результате уже в первые недели отопительного сезона, станет возможным выявить наиболее «проблемного» потребителя района, оперативно приступить к наладочным мероприятиям

и оценить эффективность работы тепло-сетевого оборудования.

Такой подход можно считать прозрачным, если будет реализован, или адаптивный, или неадаптивный алгоритм управления с использованием «корректной» математической модели системы отопления здания, способной стать универсальной для любой системы, не отвлекаясь на второстепенные факторы. Подобное исследование приведено в работе [1], из которой для настоящего исследования оптимальной является следующая модель:

$$\begin{cases} Q_o = [1 - \exp(-KF/(cG))]cG(t_{вх} - t_b); \\ t_{вых} = t_b + (t_{вх} - t_b) \cdot \exp(-KF/(cG)), \end{cases} \quad (1)$$

где Q_o , K и F – мощность, коэффициент теплопередачи и площадь поверхности нагрева отопительной установки (ОУ); c , G , $t_{вх}$ и $t_{вых}$ – теплоёмкость, массовый расход теплоносителя, его температура на входе в ОУ и выходе из нее; t_b – температура воздуха в показательном помещении.

В технике теплоснабжения ряд переменных величин, входящих в уравнение теплового баланса,

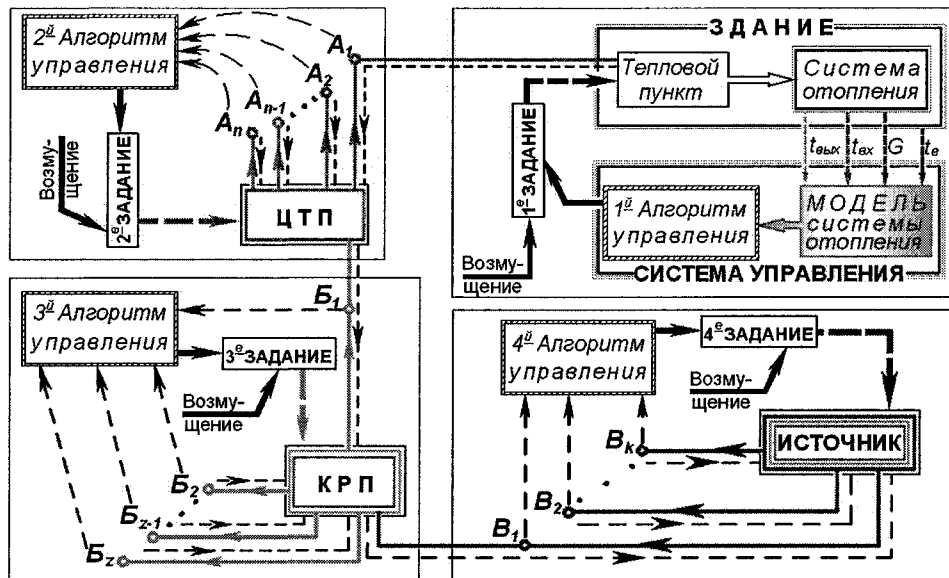


Рис. 1. Схема управления СЦТ

принято заменять некоторыми коэффициентами. Поэтому на практике принято обходить те зависимости, где K и F присутствуют в явном виде. В рамках исследования было решено идентифицировать именно параметр KF , для чего уравнение (1) было решено переписать в логарифмическом масштабе и выразить критерий идентификации параметра KF :

$$I(KF) = \sum_{i=1}^n \left[\ln \left(\frac{(t_{\text{вых}}^i - t_{\text{вх}}^i)}{(t_{\text{вх}}^i - t_{\text{вх}}^i)} \right) + KF / (cG_i^3) \right]^2. \quad (2)$$

Дифференцирование уравнения (2) по KF дает искомого уравнение:

$$KF = - \left[\sum_{i=1}^n \left(\ln \left(\frac{(t_{\text{вых}}^i - t_{\text{вх}}^i)}{(t_{\text{вх}}^i - t_{\text{вх}}^i)} \right) / cG_i^3 \right) \times \sum_{i=1}^n (cG_i^3)^2 \right]. \quad (3)$$

Для отыскания оптимального значения параметра KF в первом приближении достаточно прибегнуть к неадаптивному алгоритму (НА) параметрической идентификации. Практически такой подход позволит заранее уточнять KF , например, на основе «сложившегося опыта» или с использованием данных некоторых экспериментальных исследований, отвечающих «нормальному» режиму работы системы отопления (СО), когда все входные переменные: G_i^3 , $t_{\text{вх}}^3$ будут удовлетворять заданному уровню поддержания $t_{\text{вх}}^3$ на заданном уровне.

В рамках настоящего исследования «исходные» экспериментальные данные были получены путем подключения 7- и 10-секционного чугунного радиатора МС-140-108 к автоматизированной установке для исследования характеристик СО, находящейся в лаборатории «Отопление» на кафед-

ре «Теплогоснабжение и вентиляция». Причем в этой же лаборатории к действующей системе отопления подключены такие же приборы отопления, которые во время эксперимента были отключены. Методика проведения эксперимента и описание лабораторной установки приведены в работе [2]. Полученные результаты эксперимента позволили по уравнению (3) вычислить значение параметра KF , равное 20,008 Вт/°С.

В то же время, для НА обновление данных об объекте управления требует производить их сравнение с ранее зарегистрированными, а затем замещать данные и вновь производить пересчет. Исследования в этом направлении предполагают необходимость формирования адаптивного алгоритма (АА) параметрической идентификации, который в конечном виде стал бы универсальным и для других моделей, в структуре которых присутствует в явном виде коэффициент теплопередачи. В итоге целесообразным сочли использовать уравнение вида:

$$b_{i+1} = b_i + 2h_i (y_{i+1}^3 - b_i x_{i+1}^3) x_{i+1}^3, \quad (4)$$

где $b = KF$, а оператор адаптивной идентификации описывался уравнением:

$$h_i = 0,5 (\gamma + (x_i^3)^2)^{-1}, \quad (5)$$

для которого зависимость (1) для $t_{\text{вых}}^3$ переписана в логарифмическом масштабе:

$$\ln \left(\frac{(t_{\text{вых}}^3 - t_{\text{вх}}^3)}{(t_{\text{вх}}^3 - t_{\text{вх}}^3)} \right) = -KF (cG_i^3)^{-1}$$

$$\text{или } y_i^3 = KF (-x_i^3), \quad (6)$$

при этом установлено, что максимальная сходимость результатов обеспечивается для $\gamma = 1$.

Если задаться значением локальной невязки или удовлетворительным числом «прогонок» через уравнение (4), то по мере накопления экспериментальных данных ($i+1$) можно сразу уточнять

значение параметра KF , соответственно предварительно определив b_i , для этого обычно пользуются МНК. После чего на практике, из «некоторых соображений», следовало бы задаться числом «прогонок» или значением невязки.

В работе предложен подход, позволяющий заранее сформировать представление о точности вычисляемого параметра, что предполагает выполнение определенных действий, которые полностью воспроизводимы для одной и более ОУ по нижеописанному эксперименту.

В качестве исходного принято значение параметра $KF = 20,008 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$, которое получено для НА и справедливо для всего возможного диапазона работы ОУ. Для АА сама обработка такого числа экспериментальных данных будет зависеть от допустимого отклонения; так, по адаптивному МНК вычислили значение b_i , равное $16,83 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$, при этом среднеквадратичное отклонение $\Delta = 1,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Откуда ясно: в начальном приближении адаптивный МНК дает большую погрешность, чем НА при обработке тех же экспериментальных данных, для которого среднеквадратичное отклонение равно $0,722 \text{ }^\circ\text{C}$ ($KF = 20,008 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$).

Методом последовательных приближений установлено, что только при числе «прогонок» $100\,000$ KF стал равным $20,008 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$. Дальнейшая «прогонка» (более $500\,000$) сколько-нибудь существенно не влияла на результат, откуда можно заключить: в нашем случае число прогонок при использовании МНК должно быть таким, чтобы среднеквадратичное отклонение удовлетворяло условию $\Delta \leq 0,722 \text{ }^\circ\text{C}$. Поэтому в АА целесообразно в начальном приближении b_i определять по формуле (3), не прибегая к методу «прогона».

Несмотря на универсальность НА понятие управления процессами теплоснабжения подразумевает необходимость использования АА, например, при отсутствии начальной удовлетворительной информации об объекте управления. Для интерпретации такого случая был проведен 2-й эксперимент (аналогичный предыдущему) в этом же помещении с такими же отопительными приборами (ОП), которые вводились в режим стандартной эксплуатации путем открытия запорной арматуры на подводках в местах присоединения к стоякам. Только здесь рассматривали существующую систему отопления, работающую более 20 лет. При прочих равных значениях входных параметров и действующих на помещение «возмущений» теплоотдача ОП заметно снизилась по сравнению с предыдущим случаем, где в том же помещении к лабораторной установке были подключены такие же, но новые ОП. Так, наблюдалось повышение $t_{\text{вых}}^3$ и понижение $t_{\text{в}}^3$. Поэтому с помощью ручной регулировки массового расхода от $0,01$ до $0,15 \text{ г/с}$ при установившемся режиме регистрировались только те значения $t_{\text{вых}}^3$ (при данной $t_{\text{вх}}^3$), которые удовлетворяют условию: $t_{\text{в}}^3$ равно от 18 до $22 \text{ }^\circ\text{C}$.

Таким образом, было зарегистрировано 60 «эталонных» измерений, на основании которых рассмотрено три шага вычислений, позволяющих наглядно проследить за изменением параметра KF с понижением температуры наружного воздуха:

I – для наружной температуры t_n от $+10$ до $0 \text{ }^\circ\text{C}$: сначала по 20 экспериментальным точкам посредством использования уравнения (3) $KF^I = 14,3 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$;

II – с учетом новых значений для t_n от 0 до $-14 \text{ }^\circ\text{C}$: считая базовым $KF^I = b_i$ по следующим 20 экспериментальным точкам с тем же условием «прогоняли» искомый алгоритм – с учетом уравнений (4)–(6), в результате получили $KF^{II} = 16,73 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$;

III – то же, t_n от -15 до $-34 \text{ }^\circ\text{C}$: аналогично, $KF^{III} = 17,46 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$.

При наличии таких данных можем производить плановую корректировку теплового режима, как самих отопительных систем, так и изменять режимы работы теплосетевого оборудования, например в ЦТП.

С учетом же того, что в начале отопительного периода ($t_n = +10 \text{ }^\circ\text{C}$) значение параметра KF меньше, чем при значительном снижении наружных температур (до $t_n = -34 \text{ }^\circ\text{C}$), то для энергосбережения адаптивный алгоритм параметрической идентификации следует разделять на несколько диапазонов наружных температур, количество которых должно устанавливаться в процессе конструирования самого графика регулирования; соответственно чем их больше, тем на более качественно уровне будет описан как график местного, так и центрального регулирования.

Кроме того, необходимо сопоставлять значения параметра KF для «эксплуатационного» (2-й эксперимент) и «проектного» (1-й эксперимент) режима, на основе чего возможно составление графиков плановой реконструкции с обеспечением стабильного теплоснабжения.

Вместе с тем интересно оценить точность построения существующих графиков регулирования. Как известно, в технике теплоснабжения для построения графика качественного регулирования применяют зависимости вида:

$$t_{\text{вх}} = t_{\text{в}} + \Delta t_p \bar{Q}_o^{-1/(n+1)} + 0,5\theta_p \bar{Q}_o; \quad (7)$$

$$t_{\text{вых}} = t_{\text{в}} + \Delta t_p \bar{Q}_o^{-1/(n+1)} - 0,5\theta_p \bar{Q}_o, \quad (8)$$

где Δt_p – расчетное значение температурного напора, которое полагается определять по формуле $0,5(t_{\text{вх.р}} + t_{\text{вых.р}}) - t_{\text{в}}$, и так как большинство отопительных систем спроектировано относительно графика (расчетного) температур $95-70 \text{ }^\circ\text{C}$, то формула для Δt_p приводится к виду $0,5(95 + 70) - t_{\text{в}}$;

$\theta_p = t_{\text{вх.р}} - t_{\text{вых.р}}$; \bar{Q}_o – относительная нагрузка, равная $(t_{\text{в}} - t_n)/(t_{\text{в}} - t_{\text{н.о}})$, где $t_{\text{н.о}}$ – расчетная температура наружного воздуха для проектирования СО (для Челябинска $-34 \text{ }^\circ\text{C}$), t_n – текущая температура наружного воздуха; n – эмпирический коэффициент.

В разных источниках $n = 0,15 \dots 0,35$, при этом

Инженерное оборудование зданий и сооружений

способ включения этого коэффициента в указанные зависимости дает повод сомневаться в точности существующих методик расчета теплового режима отопительных систем, а именно:

1 случай. С одной стороны изменение n при нахождении коэффициента теплопередачи существенно влияет на величину мощности ОУ, причем расчетную, определяемую по формуле $Q_{o,p} = KF\Delta t_p$, в которой $K = m(\Delta t_p)^n \bar{G}^p$, где m и p – прочие эмпирические коэффициенты, \bar{G}^p – относительный расход воды;

2 случай. С другой стороны с учетом уравнений (7) и (8) $Q_{o,p} = cG(t_{вх,p} + t_{вых,p})$. Следует отметить, что уравнения (7) и (8) получены с учетом первого случая, т. е. $K = m(\Delta t_p)^n \cdot \bar{G}^p$.

Важно то, что при любых исходных данных мощность, найденная в «1 случае» будет всегда существенно меньше, чем во «2 случае», а это уже исключает соблюдение равенства в уравнении теплового баланса.

В то же время исследование показало, что в структурах уравнений (7) и (8) изменение коэффициента n не сильно влияет на сам график регулирования, рис. 2, для которого показан возможный диапазон изменения температуры теплоносителя (заштрихованная область, ограниченная наклонными кривыми). Как видно из рисунка, срезка температур теплоносителя заметно отличается только к концу отопительного периода ($t_n = 10^\circ\text{C}$), а при $t_{н,о}$ всегда постоянна -95 и 70°C .

Кроме того, зависимости (7) и (8) позволяют сформировать субъективное представление о гра-

фике регулирования, так как не включают во внимание величину расхода теплоносителя. Для восполнения этого упущения в работе предложено доработать процедуру вывода уравнения (7), в результате получена более точная зависимость:

$$t_{вх} = \left(\frac{1}{KF} + \frac{0,5}{cG} \right) Q_{o,p} \frac{t_b - t_n}{t_b - t_{н,о}} + t_b, \quad (9)$$

для которой во всем диапазоне можем строить не только график качественного, но и количественного регулирования, изменяя расход G теплоносителя, зная параметр KF и расчетное значение мощности $Q_{o,p}$.

Тогда температуру обратной воды следует находить из уравнения (1):

$$t_{вых} = t_b + (t_{вх} - t_b) \cdot \exp(-KF/(cG)). \quad (10)$$

Для корректного сравнения предлагаемых и известных зависимостей параметр KF примем усредненным (как в технике теплоснабжения обычно принимают значение коэффициента n), т. е. равным $20,008 \text{ Вт}/^\circ\text{C}$. Для этого случая по уравнениям (9) и (10) построен новый график регулирования, показанный на рис. 2 пунктирными линиями. Значимость именно такого подхода вызвана анализом типа жилой застройки г. Челябинска, который показал, что большая часть жилых домов отвечают найденному значению параметра $KF = 20,008 \text{ Вт}/^\circ\text{C}$. Тогда ясно, что при высоких значениях наружных температур температура теплоносителя должна быть значительно меньше стандартной «нижней срезки».

Замечание. Совместное рассмотрение уравнений (7), (8) и (9), (10) при наличии нагрузки ГВС,

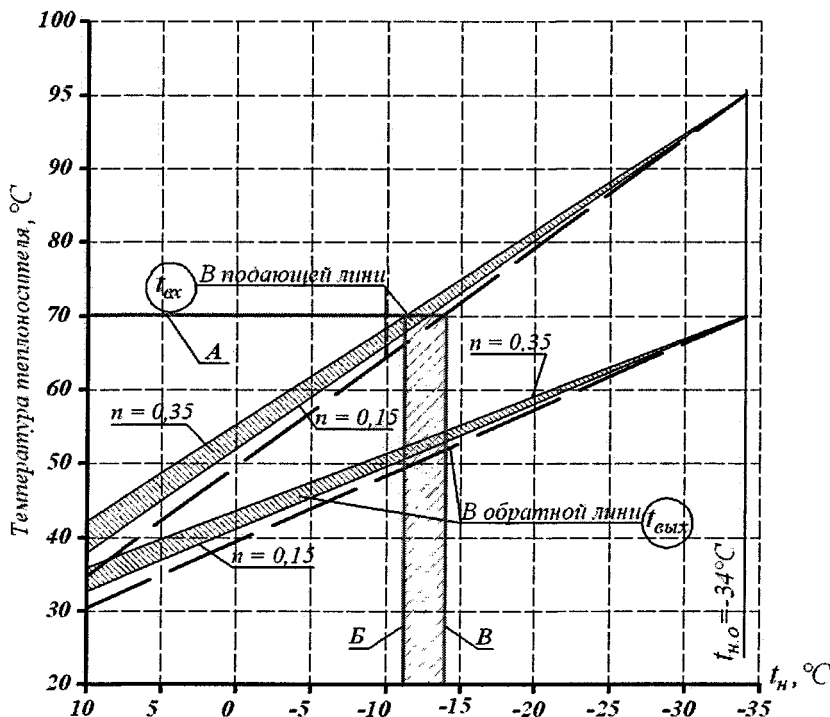


Рис. 2. Графики регулирования температуры теплоносителя в зависимости от способа их построения

для нашего случая, выявляет интересную особенность: $t_{вх}$ не может быть ниже 70 °С (горизонтальная прямая А на рис. 2). Поэтому корректировка графика позволит поддерживать температуру подаваемой воды на этом уровне дольше; на рис. 2 это диапазон (заштрихованная область), ограниченный вертикальными прямыми Б и В.

Параллельно было проведено исследование по аппроксимации коэффициентов входящих в уравнение (11), позволяющее вычислить текущее значение температурного напора Δt в зависимости от наружной температуры и удобного для подстановки в уравнения (7), (8) и (9), (10). Исходными данными явились те же экспериментальные точки (см. работу [2]), используемые для определения KF^I , KF^{II} , KF^{III} . Процедура выполнялась методом наименьших квадратов для искомой зависимости:

$$\Delta t = \beta(Q_{o,p} \bar{Q}_o)^\alpha, \tag{11}$$

где коэффициенты β и α главным образом отражают характер инерционности ОП, зависящей от приоритетной составляющей его теплоотдачи – конвективной (конвектора) или радиационной (плоские или секционные ОП). β и α определялись при изменении Q_o , для чего была определена ее связь с температурой наружного воздуха через \bar{Q}_o .

При конструировании графика регулирования конкретной СО здания или группы зданий β и α предлагается выбирать по характеристике «типового» для здания ОП, по его номинальной теплоотдаче и предполагаемому диапазону изменения расхода воды через этот прибор по соответствующей таблице.

Для примера ниже приведен фрагмент такой таблицы, позволяющей установить значение эмпирических коэффициентов. Например, считая, что конвективная составляющая теплоотдачи отопительных приборов минимальна (до 30 %), а преобладает радиационная, результаты будут такими:

Характеристика отопительного прибора	Номинальный тепловой поток (или $Q_{o,p}$), Вт			
	900...1400			
Секционный радиатор	$G = 0,010 \dots 0,014$ кг/с	$G = 0,015 \dots 0,024$ кг/с	$G = 0,025 \dots 0,003$ кг/с	$G = 0,031 \dots 0,035$ кг/с
	$\alpha = 0,2597$	$\alpha = 0,2016$	$\alpha = 0,1155$	$\alpha = 0,1342$
	$\beta = 0,011620$	$\beta = 0,013184$	$\beta = 0,020135$	$\beta = 0,017597$

Относительно указанной таблицы, с учетом зависимости (11) преобразовывали уравнения (9) и (10), т. е. привели их к такому виду, чтобы в структуре присутствовало «требуемое» (текущее) значение температурного напора Δt при данной t_n , конечный вид формул для построения температурного графика приведен ниже

$$t_{вх} = \left(\beta(Q_{o,p} \bar{Q}_o)^\alpha + \frac{0,5}{cG} \right) Q_{o,p} \frac{t_n - t_{н.о}}{t_n - t_{н.о}} + t_n; \tag{12}$$

$$t_{вых} = t_n + (t_{вх} - t_n) \cdot \exp \left(- \frac{1}{\beta(Q_{o,p} \bar{Q}_o)^\alpha cG} \right), \tag{13}$$

которые позволяют построить уточненный график качественно-количественного регулирования, например, для $\beta = 0,011620$ и $\alpha = 0,2597$ это кривые 1 и 2 – рис. 3, там же для наглядности представлен общепринятый график (пунктирные линии 3 и 4).

Изучение отзывов и отчетов теплоснабжающих организаций за наблюдением работы СЦТ выявило следующую особенность о тепловом режиме зданий. Так, при соблюдении графика регулирования (рис. 3, пунктирные линии) наблюдаются следующие жалобы от населения:

- в I диапазоне регулирования (ДР) имеет место «перетоп» помещений, достигающий максимума при $t_n = +5 \dots 10$ °С (см. нижнюю пунктирную кривую на рис. 3 «Температура внутреннего воздуха»);

- при $t_n = -15 \dots -5$ °С тепловой режим оценивался как удовлетворительный;

- в III ДР наблюдается значительный недостаток тепла при понижении t_n . В «ожидании» этого ДР жильцы домов герметизируют неплотности через ограждающие конструкции, что странно, если учесть, особенность определения мощности отопительных приборов – относительно теплопотерь при $t_{н.о} = -34$ °С с дополнительной корректировкой на трехкратный воздухообмен. Последнее обеспечивает эффект «открытой форточки», а следовательно при соблюдении графика регулирования и дополнительном утеплении оконных проемов должен происходить перегрев помещений, а не наоборот.

Выводы

Стандартный подход к конструированию любых графиков регулирования некорректен не только из-за «исходной» структуры – уравнения (7) и (8), но и из-за входящих в нее расчетных величин. Также из рис. 3 (кривые 1 и 2) видно, что уравнения (12) и (13) даже в первом приближении могут исключить отмеченные на практике проблемы – снизить перегрев помещений в I ДР и компенсировать потребность в тепле в III ДР. Дополнительно корректировка искомых графиков позволит оптимизировать работу части тепломеханического оборудования в тепловых пунктах разного назначения; для большинства же из них расчет оборудования характеризуется параметрами работы ОУ именно в I и начале II ДР (см. рис. 3). Например, для г. Челябинска продолжительность

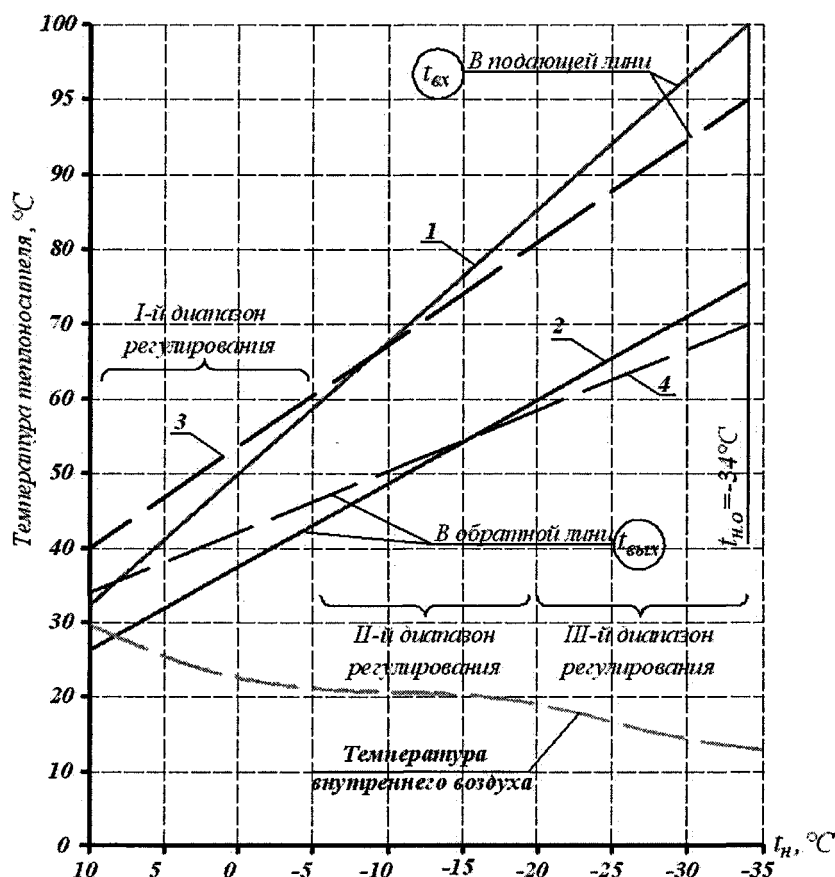


Рис. 3. Сопоставление отопительных графиков регулирования

этого периода составляет не менее 3000 ч в год, следовательно, есть возможность существенного снижения потребления топливных ресурсов, транспортный теплопотеря и потеря от «перетопа» помещений, которые увеличиваются при большей разности между $t_{вх}$ и $t_{н}$. В свою очередь это автоматически позволит организовать схему управления СЦТ, представленную на рис. 1.

Литература

1. Денисенко, Ю.Н. К проблеме построения математических моделей отопительного прибора /

Ю.Н. Денисенко, В.И. Панферов // Теоретические основы теплогасоснабжения и вентиляции: материалы Второй Международной науч.-техн. конф. — М.: МГСУ, 2007. — С. 101–106.

2. Денисенко, Ю.Н. Параметрическая идентификация модели системы отопления по выходной температуре теплоносителя / Ю.Н. Денисенко, В.И. Панферов // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды: материалы VI Международной науч. конф. — Волгоград: ВолГАСУ, 2008. — С. 293–298.

Поступила в редакцию 25 сентября 2008 г.

Денисенко Юрий Николаевич. Инженер кафедры «Теплогасоснабжение и вентиляция» ЮУрГУ.

Область научных интересов: оптимизация процессов управления систем теплогасоснабжения на основе математического моделирования тепло-гидравлических режимов.

Yury N. Denisenko. Engineer of the Heat and Gas Supply and Ventilation Department of South Ural State University.

Scientific interests: optimization of the processes of the heat supply system control on the basis of the mathematical modelling of the warm-hydraulic modes.

Научно-методический раздел

УДК 681.327.11

3D-МОДЕЛИ ЛИНЕЙЧАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ТРЕМЯ ПРЯМОЛИНЕЙНЫМИ НАПРАВЛЯЮЩИМИ

А.Л. Хейфец, А.Н. Логиновский

3D-MODELS OF RULED SURFACES WITH THREE RECTILINEAR GUIDES

A.L. Kheyfets, A.N. Loginovsky

Приведены алгоритмы построения 3D-моделей эллиптического гиперboloида и гиперболического параболоида в среде пакета AutoCAD. Рассмотрено решение ряда задач на частные случаи пересечения.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, геометрическое моделирование, 3D-технологии, линейчатые поверхности, AutoCAD.

Algorithms of 3D-modeling of elliptical hyperboloid and hyperboloid paraboloid in AutoCAD application are given. Solution of problems on special cases of intersection is considered.

Keywords: computer simulation, geometric simulation, 3D-technologies, ruled surfaces, AutoCAD.

Эллиптический (однополостный) гиперboloид и гиперболический параболоид (косая плоскость) приводятся в аналитической и начертательной геометрии в качестве канонических примеров моделирования. Особый интерес вызывает моделирование кинематического представления этих поверхностей как результата движения образующей прямой линии по трем прямолинейным направляющим.

Цель работы – на примере построения 3D-моделей названных поверхностей показать новые возможности компьютерного геометрического моделирования в пакете AutoCAD, как наиболее адаптированном для теоретического анализа [1, 2].

Универсальный алгоритм вращающейся плоскости. В работе [2] показано построение моделей рассматриваемых поверхностей на основе алгоритма, который является реализацией известной задачи о нахождении прямой f , пересекающей скрещивающиеся прямые a , b и проходящей через точку P (рис. 1). Нужно задать вспомогательную плоскость α , проходящую через прямую a и точку P , найти точку $1 = \alpha \cap b$. Точки P и 1 определяют искомую прямую f , которая в точке 2 пересекает прямую a .

При перемещении точки P вдоль прямой c , либо при вращении плоскости α вокруг a будет получено все множество прямых f , пересекающих три заданные прямые a , b , c , то есть каркас поверхности. Если прямые a , b , c принадлежат семей-

ству направляющих, рассмотренная задача позволяет найти образующие линии каркаса, и наоборот.

Наглядность построения обеспечивается введением ограничивающих плоскостей или поверхностей. На рис. 1 показан отрезок 3–4 прямой f , отсеченный плоскостями β и γ .

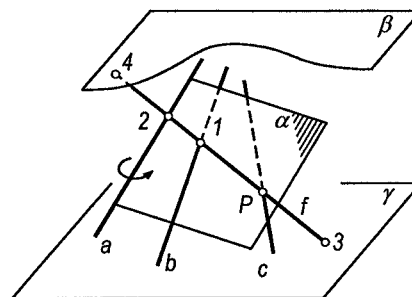


Рис. 1. Построение прямой, пересекающей три скрещивающиеся прямые

Однако построение модели на основе алгоритма вращающейся плоскости приводит к существенной неравномерности каркаса [2], снижающей точность получаемых поверхностей. Возникают сложности, связанные с появлением удаленных точек, когда плоскость α приближается к положению плоскостей параллелизма прямых.

Эллиптический гиперboloид. Рассмотрим алгоритм, лишенный указанных недостатков и учитывающий особенности формы эллиптическо-

Научно-методический раздел

го гиперboloида. В качестве примера построим гиперboloид, задаваемый тремя отрезками прямых (команда *line*) – это направляющие $d1...d3$ с координатами конечных точек: $d1: (58, 32, 28), (122, 44, 95)$; $d2: (112, 28, 0), (56, 66, 95)$; $d3: (87, 67, 0), (45, 37, 73)$.

Алгоритм реализуется в следующей последовательности.

Находится центр симметрии гиперboloида. Определяется плоскость, гарантирующая рассечение гиперboloида по эллипсу. Плоскость параллельно смещается от центра на половину высоты гиперboloида и принимается за плоскость опорного эллипса. Строится «опорный» эллипс. Из условий подобия строятся еще 5...10 сечений гиперboloида, параллельных «опорному». Найденные эллипсы образуют каркас поверхности, по которому создается сеть и *solid*-объект.

Центр симметрии гиперboloида находим, исходя из того, что у любой линии семейства направляющих имеется параллельная ей линия из семейства образующих, расположенная симметрично относительно искомого центра [5]. Найдем образующую f , параллельную направляющей $d2$ (рис. 2) и пересекающую две другие направляющие $d1, d3$. Для этого нужно установить систему координат (ПСК), направив ось Z вдоль направляющей $d2$ (ucs/za). Построим проекции двух других направляющих на плоскость XY ПСК – прямые $d1', d3'$. Копируем $d2$, совмещая ее конечную точку 0 с точкой $A=d1' \cap d3'$ – получаем образующую f . В точках 1, 2 прямая f пересечет направляющие $d1, d3$. Находим «срединную прямую» m . Для этого нужно опустить перпендикуляр p из произвольной точки образующей f на направляющую $d2$ и скопировать f в среднюю точку 3 перпендикуляра p .

Подобным образом находится образующая, параллельная $d1$ и пересекающая направляющие $d2, d3$, и вторая срединная прямая m' . На пересечении срединных прямых m и m' поставьте маркер точки – это центр симметрии гиперboloида, точка C , которая в нашем примере имеет координаты (71.6, 42.7, 48.1).

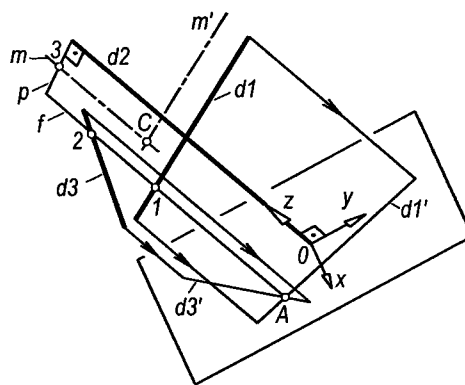


Рис. 2. Нахождение центра гиперboloида

Для задания плоскости, гарантирующей сечение гиперboloида по эллипсу, из центра C опустим перпендикуляры на направляющие $d1, d2$. Зададим плоскость ($ucs/3$) по точке центра и основаниям перпендикуляров. Эта плоскость находится в области горловины гиперboloида. Поэтому, измерив (*list*) длину одного из перпендикуляров, примем ее за характерный размер r горловины гиперboloида. Зададим высоту гиперboloида как $H=(4...6) \cdot r$.

Плоскость параллельно сместим (ucs/o) от центра C на $0.5H$ и примем за плоскость «опорного» эллипса – плоскость γ (рис 3, а).

Опорный эллипс строится по трем точкам и двум касательным «с выходом в пространство» [6]. Точки 1...3 (рис. 3, а) эллипса найдем как точки пересечения плоскости γ с направляющими $d1...d3$. В точках 1, 3 находим образующие $f1, f3$. Плоскости $d1 \cap f1$ и $d3 \cap f3$ являются касательными плоскостями к поверхности гиперboloида. Находим отрезок 4-5 взаимного пересечения касательных плоскостей и точку $S=(4-5) \cap \gamma$, из которой строим касательные $S-1$ и $S-3$ к искомому эллипсу.

В плоскости γ строим окружность c произвольного радиуса с центром в точке S . Находим отрезок 6-7 и его среднюю точку 8. Вращением (*revolve*) треугольника $S-7-8$ создаем *solid*-конус. В точке 2 (рис. 3, б) восстанавливаем перпендику-

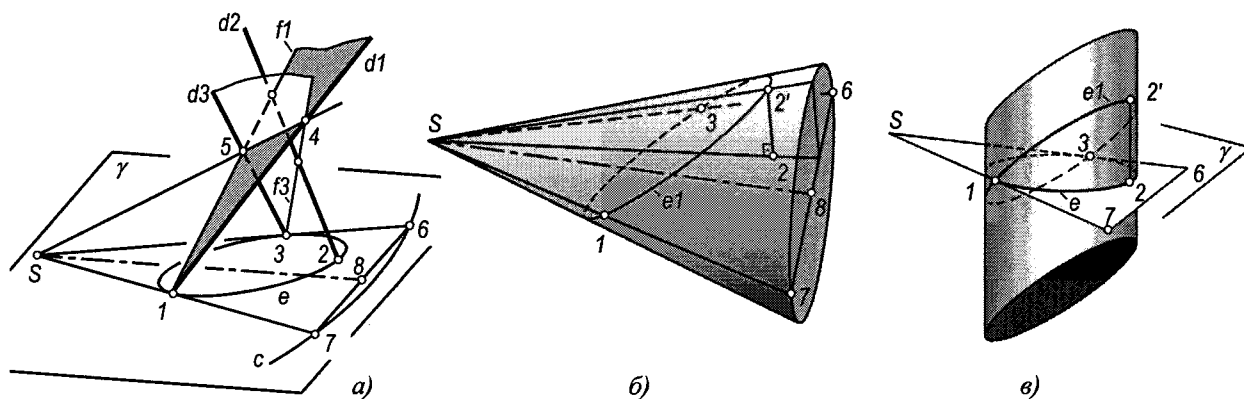


Рис. 3. Построение эллипса по трем точкам и двум касательным

ляр к плоскости γ (S-7-8), и на его пересечении с поверхностью конуса находим точку $2'$. Строим сечение (*section*) конуса плоскостью, проходящей через точки $1, 2', 3$ и получаем эллипс $e1$. Выдавливаем (*extrude / path*) эллипс $e1$ по направлению $2-2'$ – получаем эллиптический цилиндр. Искомый эллипс e получим как сечение цилиндра (*section*) плоскостью γ (рис. 3, в).

Соединив (рис. 4, а) отрезком прямой (*line*) центр опорного эллипса e (точка 9 , объектная привязка *Center*) с центром гиперboloида, точкой C , получим отрезок ($9-C$) как геометрическое место центральных точек эллипсов сечений, параллельных опорному. Равномерным делением отрезка ($9-C$) задаем на нем ряд точек, в каждой из которых строим эллипс сечения. Например, для построения эллипса $e2$, копируем эллипс e , переместив его центр в точку 10 – получаем эллипс e' . Находим точку 11 пересечения одной из направляющих, например $d1$, с плоскостью эллипса e' . Построив (*line*) отрезок ($10-11$), удлинняем его (*extend*) до пересечения с e' – получаем точку 12 . Масштабируем (*scale / reference*) эллипс e' так, чтобы точка 12 «перешла» в точку 11 – получим эллипс $e2$.

Построив 3...5 эллипсов сечений по одну сторону от центра гиперboloида C , сечения с другой стороны следует получить центральной симметрией относительно центра C . Для этого к полученным эллипсам нужно применить зеркальное преобразование (*mirror3d*) относительно плоскости, параллельной γ и проходящей через точку C , с последующим поворотом (*rotate*) отображенных объектов на 180° относительно точки C .

Для повышения точности модели каркас гиперboloида (рис. 4, б) следует дополнить гиперболами $h1...h4$, каждая из которых создается как сплайн (*spline*) по конечным точкам осей эллипсов, выявляемым объектной привязкой *Quadrant*.

Применив к построенному каркасу команду *loft* и передав ей эллипсы в качестве образующих, а гиперболы в качестве направляющих, получим *solid*-объект.

На рис. 4, в показано определение оси симметрии гиперboloида, являющейся его важной метрической характеристикой. Поскольку алго-

ритм *точного* нахождения оси гиперboloида геометрическими построениями неизвестен [5], предложим вариант ее приближенного построения. Нужно из центра гиперboloида C создать сферу и найти линию ее пересечения (*union*) с гиперboloидом, содержащую две ветви $b1, b2$, симметричные относительно центра C . Ось гиперboloида проходит через центр C параллельно прямой, соединяющей экстремальные точки $13, 14$ этих ветвей. Можно определить направление оси и как вектор взгляда (*3dorbit*), при котором ветви $b1, b2$ совмещаются как два равных эллипса в проекции на плоскость вида.

Задав положение секущих плоскостей перпендикулярно найденной оси и повторив построения, получим *solid* с каноническим каркасом (рис. 4, г), в котором эллипсы сечений перпендикулярны оси гиперboloида. Сечение, перпендикулярное оси и проходящее через центр, будет горловинным сечением – это также важная метрическая характеристика гиперboloида.

Применив к *solid*-объекту команду *solidedit / shell*, получим гиперboloид как оболочку требуемой толщины. Оболочка на рис. 4, г имеет толщину 10^{-3} и изображена вместе с исходными направляющими $d1...d3$, пересекающими ее каркас.

Гиперболический параболоид. Если направляющие параллельны некоторой плоскости, то изменяется качественная сторона создаваемой поверхности – возникает гиперболический параболоид. Рассматриваемый ниже алгоритм построения этой поверхности направлен на создание пространственного четырехугольника, составляющего основу его линейчатого каркаса.

Алгоритм реализуется в следующей последовательности. Находятся ось и центр симметрии поверхности. Строится пространственный четырехугольник каркаса, симметричный относительно центра поверхности. Равномерным делением противоположных сторон четырехугольника строится линейчатый каркас. Создается сетевая поверхность и на ее основе *solid*-оболочка.

Рассмотрим пример построения поверхности, если направляющие (*line*) заданы тремя отрезками $d1...d3$ (рис. 5, а и рис. 6, а), параллельными плос-

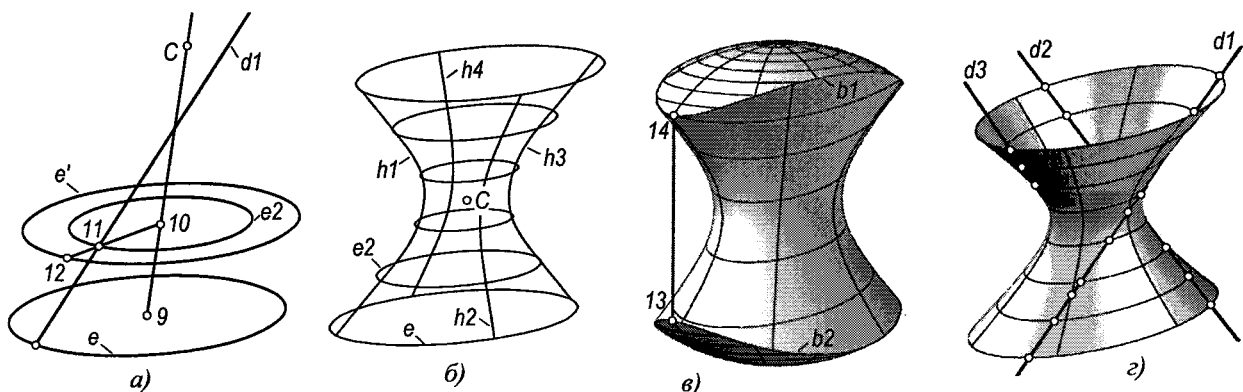


Рис. 4. Построение гиперboloида с эллиптическим каркасом

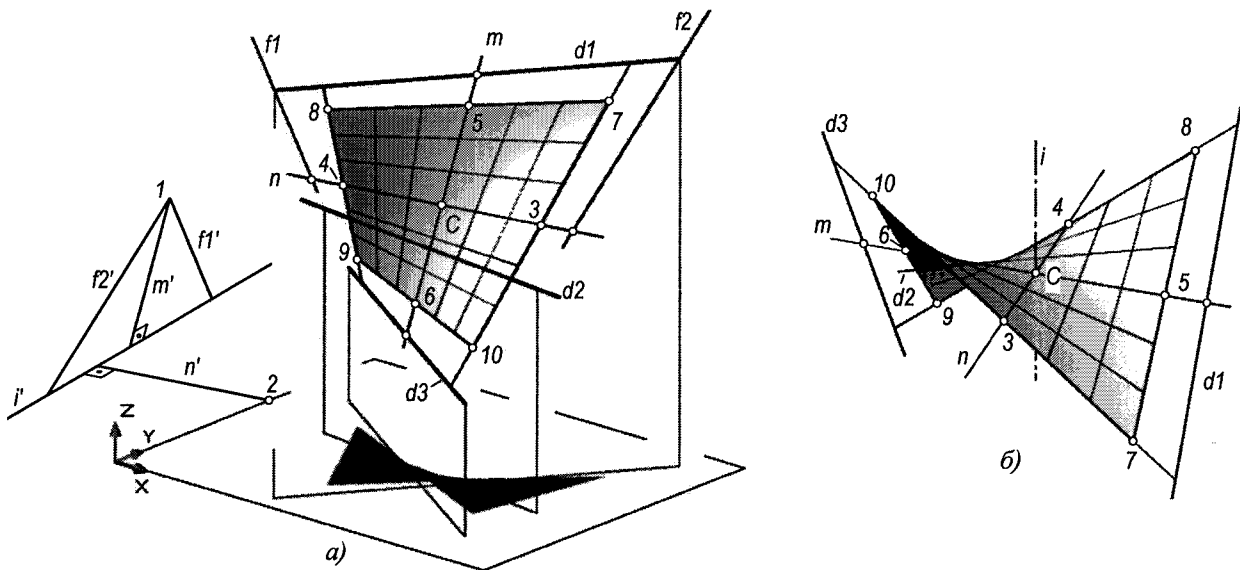


Рис. 5. Построение гиперболического параболоида с линейчатым каркасом

кости XY . Координаты $d1$: (33, 4, 76), (76, 63, 76); $d2$: (18, 35, 42), (73, 28, 42); $d3$: (10, 51, 25), (71, 11, 25).

Нахождение оси и центра симметрии гиперболического параболоида выполняется, исходя из того [5], что ось симметрии параллельна линии пересечения плоскостей параллелизма этой поверхности. Образующая и направляющая прямые, проходящие через центр симметрии, перпендикулярны своим плоскостям параллелизма.

Плоскость параллелизма направляющих задана – это плоскость XY системы координат, в которой построены направляющие $d1...d3$. Для нахождения плоскости параллелизма образующих построим образующие $f1, f2$, проходящие через конечные точки направляющей $d1$ (рис. 5, а). Образующие находятся с помощью вспомогательных секущих плоскостей, проходящих через направляющую $d2$ или $d3$ (см. плоскость α , рис. 1). Образующие копируем в произвольную точку 1 . В нашем примере рекомендуем координаты точки 1 : (-32, 42, 22). Поскольку при копировании обеспечивается параллельность прямых, получаем плоскость $f1' \cap f3'$ как вторую плоскость параллелизма.

Находим прямую i' пересечения плоскостей параллелизма. В плоскостях параллелизма строим перпендикуляры к прямой i' : m' – перпендикуляр из точки 1 , n' – перпендикуляр из произвольной точки 2 , принадлежащей плоскости XY . В нашем примере рекомендуем точку 2 с координатами (0, 40, 0).

Найдем образующую m как прямую, параллельную заданному направлению m' и пересекающую две направляющие $d1, d3$. Найдем также линию семейства направляющих $n // n'$ как прямую, пересекающую образующие $f1, f2$. Прямые m и n пересекаются в точке C , являющейся центром симметрии параболоида.

Строим пространственный четырехугольник, симметричный относительно найденного центра. Для этого на прямых m и n в обе стороны от цен-

тра C откладываем равные отрезки произвольной длины (в нашем примере рекомендуем длину 20...30) и находим точки $3...6$. В точках $3, 4$ строим образующие, в точках $5, 6$ – направляющие. На пересечении образующих с направляющими находим точки $7...10$, являющиеся вершинами искомого четырехугольника.

Разделим (*divide*) пары противоположных сторон четырехугольника на равные части и соединим их отрезками прямых, создав семейства направляющих и образующих (рис. 5, а). Рекомендуем создать 5...10 образующих и 3...10 направляющих. Командой *loft* создадим сеть, передав ей образующие и направляющие в порядке их следования. Командой *thicken* создадим из сети оболочку необходимой толщины. На рис. 5, б созданная поверхность имеет толщину 0.01 и показана в каноническом виде (*3dorbit*) с вертикальным положением ее оси симметрии i .

Задача. Рассмотрим в качестве примера применения моделей известную задачу о нахождении прямой, пересекающей четыре заданные скрещивающиеся прямые [6].

Пусть заданы отрезки четырех скрещивающихся прямых $d1...d4$ (рис. 6, а). Координаты $d1...d3$ приведены выше при построении модели параболоида, эти отрезки компланарны. Координаты $d4$: (83, 40, 39); (16, 17, 72).

Для решения произвольно выбираем три прямые из четырех заданных и рассматриваем их как направляющие линейчатой поверхности. Находим две точки пересечения четвертой прямой с выбранной поверхностью. В найденных точках строим образующие прямые выбранной поверхности. Эти прямые будут искомыми, поскольку каждая из них, являясь образующей линейчатой поверхности, пересекает три выбранные прямые как направляющие, и проходит через точку, принадлежащую четвертой прямой.

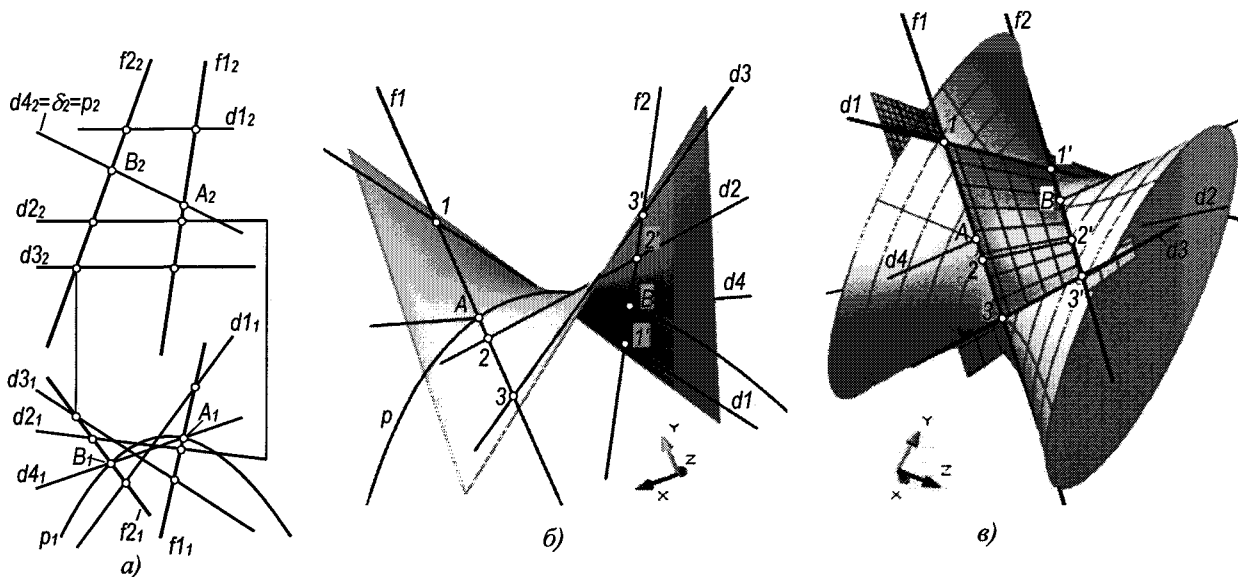


Рис. 6. Построение прямых, пересекающих четыре скрещивающиеся прямые

На рис. 6, б приведено решение, в котором в качестве направляющих выбраны прямые $d1...d3$. Построена парабола p как сечение параболоида, определяемого направляющими $d1...d3$, фронтально-проецирующей секущей плоскостью δ . Парабола p найдена «выходом в пространство» как коническое сечение по трем точкам пересечения плоскости δ с $d1...d3$ и касательным, построенным в двух из трех точек пересечения (подобно эллипсу на рис. 3). Строить поверхность параболоида нет необходимости, параболоид на рис. 6, б приведен лишь для наглядности. Далее, в точках A, B пересечения параболы p с прямой $d4$ построены образующие параболоида $f1, f2$. Эти прямые являются ответом задачи. Прямая $f1$ пересекает прямые $d1...d4$ в точках $1, A, 2, 3$. Прямая $f2$ пересекает прямые $d1...d4$ в точках $1', B, 2', 3'$.

Задача имеет четыре варианта решения. Приведенный пример дает решение с параболоидом. Другие сочетания – с гиперboloидами. Взаимные пересечения поверхностей, задаваемых тройками направляющих прямых, происходят по четырем прямым, из которых две – это общие направляющие поверхностей, а две другие – найденные прямые $f1, f2$. Например, пересечение параболоида, задаваемого прямыми $d1, d2, d3$ с гиперboloидом, заданным прямыми $d1, d3, d4$, происходит по прямым $d1, d3$ и $f1, f2$ или по пространственному четырехугольнику $1-1'-3'-3$ (рис. 6, в). Рассмотренный пример отражает «редкий» случай распада линии пересечения на четыре прямые [3, 4].

Для оценки точности создаваемых 3D-моделей через одну из направляющих и центр гиперboloида строили его сечение (*section*). Теоретически сечение представляет собой прямоугольник, одной из сторон которого является выбранная направляющая. Погрешность модели приводит к тому, что линия сечения является сплайном, вершины которого отклоняются от прямолинейности. Опре-

деляли среднее отклонение по десяти точкам сплайна. Как видно из рис. 7, для получения точной модели необходим каркас, содержащий 7...9 эллиптических сечений.

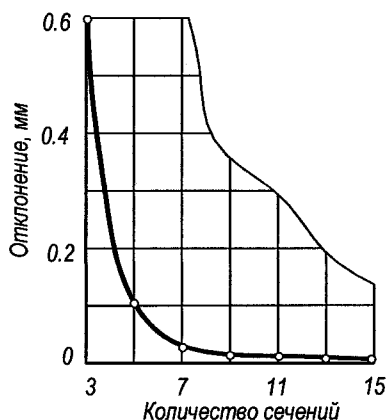


Рис. 7. Влияние плотности каркаса на погрешность модели гиперboloида

Рассмотренные алгоритмы и модели являются весьма трудоемкими. Требуется многократное повторение однотипных операций. Поэтому, хотя все и модели были тестированы в ручном варианте, разработаны программы их построения на языке AutoLisp [2].

Выводы

1. Полученные модели являются достаточно точными, позволяют по-новому, проще и нагляднее, чем методы начертательной геометрии, решать сложные задачи геометрического моделирования.
2. Решена задача о распадении линии пересечения гиперboloидов и параболоидов на четыре прямые.
3. Разработаны программы на языке AutoLisp для построения рассмотренных моделей.

Научно-методический раздел

4. Модели представляют интерес с позиций освоения алгоритмов 3D-компьютерного моделирования.

Литература

1. Хейфец, А.Л. Новые возможности 3D-моделирования линейчатых поверхностей в AutoCAD 2007 / А.Л. Хейфец, А.Н. Логиновский // *Состояние проблемы и тенденции развития графической подготовки в высшей школе: сб. тр. Всероссийского совещания заведующих кафедрами графических дисциплин вузов РФ, 20–22 июня 2007 г., г. Челябинск.* – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – Т. 2 – С. 125–133.

2. Хейфец, А.Л. Инженерная компьютерная графика AutoCAD. Опыт преподавания и широта взгляда / А.Л. Хейфец. – М.: Диалог-МИФИ, 2002. – 432 с.

3. Хейфец, А.Л. 3D-моделирование частных случаев пересечения поверхностей второго порядка

в пакете AutoCAD / А.Л. Хейфец, С.В. Ерохин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура».* – 2003. – Вып. 2. – №7(23). – С. 93–95.

4. Хейфец, А.Л. 3D-компьютерное моделирование пересечения эллиптических конусов при их двойном соприкосновении. AutoCAD. / А.Л. Хейфец, В.А. Короткий // *GraphicCon '2006. Труды конференции. 16-я Международная конференция по компьютерной графике и ее приложениям.* – Новосибирск: «Прайс-курьер». 2006. – С. 128–133.

5. Короткий, В.А. Метрические свойства поверхностей второго порядка: учебное пособие / В.А. Короткий. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 70 с.

6. Пеклич, В.А. Задачи по начертательной геометрии: учебное пособие для вузов / В.А. Пеклич, С.Н. Павленко. – М.: Высш. шк., 1999. – 139 с.

Поступила в редакцию 24 апреля 2008 г.

Хейфец Александр Львович. К.т.н, профессор, заведующий кафедрой графики ЮУрГУ. E-mail: heifets@yandex.ru.

Alexander L. Kheyfets. Candidate of Engineering Science, professor, Head of the Graphics Department, SUSU (South Ural State University). E-mail: heifets@yandex.ru.

Логиновский Александр Николаевич – к.т.н, доцент кафедры графики ЮУрГУ.

Alexander N. Loginovsky. Candidate of Engineering Science, associate professor of the Graphics Department, SUSU (South Ural State University).

*Подписной индекс Вестника ЮУрГУ,
серия «Строительство и архитектура» 29563,
объединенный каталог «Пресса России».
Периодичность выхода – 2 номера в год.*

*Информация о «Вестнике ЮУрГУ» и требования к оформлению статей
доступны в Интернет по адресу:
<http://www.susu.ac.ru/ru/science/publish/vestnik/>*

**ВЕСТНИК
ЮЖНО-УРАЛЬСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
№ 25 (125) 2008**

**Серия
«СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА»
Выпуск 7**

Издательство Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 22.10.2008. Формат 60×84 1/8. Печать трафаретная.
Усл. печ. л. 6,97. Уч.-изд. л. 7,38. Тираж 500 экз. Заказ 400/455.

Отпечатано в типографии Издательства ЮУрГУ.
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76