МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ

МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**

# СТРОИТЕЛЬСТВО

**№ 4 (640)**
Апрель 2012 г.

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

*Главный редактор* В.Г. Себешев

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

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

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

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 23.04.12. Формат 70×108 $^{1}/_{16}$.
Усл. печ. л. 11,55+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 1566.

ООО «Партнеры Сибири»,
630009, г. Новосибирск, ул. Добролюбова, 16.

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ**

**Лесовик В.С., Чернышева Н.В., Клименко В.Г.** Процессы структурообразования гипсосодержащих композитов с учетом генезиса сырья ..... 3

**Мирюк О.А.** Влияние железистого компонента на твердение магнезиальных композиций ..... 12

**Котляр В.Д.** Особенности пресс-порошков на основе опок при производстве керамического кирпича ..... 19

**Саградян А.А., Зимакова Г.А.** Изучение свойств тяжелого бетона, модифицированного органоминеральной добавкой, включающей зольные микросферы ..... 26

**ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА**

**Данилов Б.Б., Смоляницкий Б.Н.** Методы повышения безопасности некоторых технологических процессов подземного строительства ..... 32

**САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА**

**Шацкий В.П., Гулевский В.А.** Особенности реализации математической модели тепло- и массообмена в косвенно-рекуперативных водоиспарительных охладителях ..... 39

**Уляшева В.М.** Исследование вентиляционных про-

цессов в помещениях с источниками тепловыделения экспериментальными и численными методами ..... 47

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

**Привалов П.В.** Оценка эффективности функционирования станций (постов) технического обслуживания строительных и дорожных машин ..... 53

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

**Адищев В.В., Шмаков Д.С.** Применение кластерного анализа для построения нечетких аппроксимаций диаграмм деформирования бетона ..... 60

**Зиганшин А.М., Посохин В.Н., Романов С.В.** Тестирование моделей свободной и пристеночной турбулентности при численном решении задачи о конвекции у вертикальной нагретой стенки ..... 71

**Криворотов А.П., Зубачев П.В.** Практический метод расчета гибкой шпунтовой стены при ярусном расположении армоэлементов ..... 80

**Монахов В.А., Потапова Т.Ю.** Формирование матрицы скорости сложного движения точки ..... 87

**Осипов С.П., Негодин А.В., Бида К.Б., Парфенов А.В.** Уравнения взаимной связи параметров износа конусных вращающихся резцов дорожных фрез ..... 95

**Пименов А.Т., Игнатова О.А., Попков А.А., Фоменко В.В.** Условия для обеспечения монолитности систем, образованных основанием и покрывающим слоем 100

**Холопов И.С., Тур В.И., Тур А.В.** Исследование напряженно-деформированного состояния узлового соединения сетчатого купола ..... 104

## В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

**Герасимов С.И., Жилкин В.А., Власов Г.М.** Контактные голографические интерферометры для исследования упругопластических деформаций элементов конструкций ..... 112

**Русов Б.П.** Экспериментальная проверка прочности полимерных балок при ударе 124

## НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Геннадию Борисовичу Лебедеву — 75 лет ..... 131

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.55.002.3

В.С. ЛЕСОВИК, Н.В. ЧЕРНЫШЕВА, В.Г. КЛИМЕНКО

## ПРОЦЕССЫ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ГИПСОСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИТОВ С УЧЕТОМ ГЕНЕЗИСА СЫРЬЯ

Предложена классификация минерального сырья для производства гипсосодержащих композитов с учетом типоморфных особенностей сырья, способствующих прогнозированию свойств материалов на уровне выбора исходных компонентов, а также при синтезе композитов.

Ключевые слова: генезис сырья, типоморфные признаки, отходы ММС.

Стратегия развития промышленности строительных материалов в Российской Федерации на период до 2020 г. направлена на расширение номенклатуры строительных материалов и создание эффективных технологий их производства с учетом генезиса сырья и устойчивости системы человек — материал — среда обитания. В связи с этим требуется разработка эффективных быстротвердеющих строительных материалов, получаемых с применением новых видов доступных сырьевых ресурсов, обладающих повышенными эксплуатационными характеристиками. Этим требованиям в полной мере отвечают гипсовые композиционные материалы, применение которых позволит снизить дефицит стеновых материалов, во многих случаях заменить энергоемкие цементные бетоны и значительно сократить сроки возведения зданий. Природный гипс является экологически безопасным веществом, не токсичен, при производстве гипсовых вяжущих не выделяются в окружающую среду $CO_2$ и другие вредные компоненты (табл. 1).

Особый интерес представляют композиты, обладающие повышенной водостойкостью, на композиционных гипсовых вяжущих (КГВ). Перспективно создание многокомпонентных систем модификацией вяжущего микро-, ультра- и нанодисперсными наполнителями в сочетании их с дру-

Таблица 1

**Экологический аспект производства минеральных вяжущих**

| Вид вяжущего | Объем производства в мире, млн т | Энергоемкость, кг у.т. | | Экология | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | пр-во кг у.т. | всего млн т у.т. | $CO_2$ | | пыль | |
| | | | | г/т | всего млн т | кг/т | всего млн т |
| Портландцемент | 2540 | 150 | 381 | 50 | 2159 | 21 | 53,34 |
| Известь | 286 | 204 | 58,34 | 28 | 151 | 5 | 1,43 |
| Гипс | 112 | 47 | 5,264 | — | — | — | — |
| Итого: | 2938 | — | 444,6 | — | 2310 | — | 54,77 |

© Лесовик В.С., Чернышева Н.В., Клименко В.Г., 2012

гими добавками, изучение физико-химических процессов, влияющих на их конечные свойства, поэтому первостепенное внимание уделяется факторам, связанным с тонкодисперсным состоянием вещества и уточнением его значимости на всех этапах жизненного цикла композита.

При производстве быстротвердеющих композитов необходимо максимально полно использовать природную энергетику сырья, которая в значительной степени зависит от его генезиса. Последний влияет на параметры кристаллической решетки, текстуру, структуру сырья, наличие дефектов кристаллической решетки минералов и в конечном итоге на свойства материалов, получаемых на его основе. Решение данного вопроса позволит классифицировать сырье по степени эффективности его использования в составе КГВ и композитов на его основе различного назначения и определить критерии подбора соотношений компонентов, учитывающие их совместимость и взаимное влияние. Важную роль в этих процессах играет природа и концентрация объемных и поверхностных сорбционных центров.

В целях уменьшения расхода энергоресурсов, упрощения и удешевления производства быстротвердеющих композитов целесообразен поиск сырья, которое заранее претерпело геологическую обработку, в результате чего они обладают различной энергетической активностью и в различной степени подготовлены к производству тех или иных строительных материалов.

Современные гипсовые вяжущие без введения в них каких-либо добавок используются редко и представляют собой, как правило, композиции с различными модификациями гипса, с комплексом минеральных и химических добавок из природного и техногенного сырья различного происхождения и механизма действия. В Белгородской области в хвостохранилищах скопилось несколько миллиардов тонн техногенного сырья — отходов мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов (отходов ММС) и др., которые могут быть успешно использованы для повышения рентабельности использования гипсосодержащих композитов.

На рис. 1 приведена классификация минерального сырья для производства КГВ, которая объединяет в себе ранее существовавшие и дополнена новыми сведениями. В ней показана необходимость принимать во внимание типоморфные особенности сырья, что способствует прогнозированию свойств материалов на уровне выбора исходных компонентов, а также при их синтезе.

Композиционные гипсовые вяжущие представляют собой гомогенную смесь дисперсных компонентов, *один* из которых выполняет функцию регулируемого раннего схватывания быстрого набора прочности (это может быть одна или сочетание модификаций гипсовых вяжущих); *другой,* или другие, — обеспечивает гидравличность вяжущего и дальнейший рост прочности за счет формирования нового типа структуры, способствуя повышению долговечности; *третьи* — модифицирующие добавки, предназначенные для резкого снижения водопотребности вяжущего, способствующие его более полной и быстрой гидратации, обеспечения сближения дислокаций, увеличивая тем самым количество контактов между частицами, регулирования других свойств в нужном направлении (для этого могут использоваться пластифицирующие добавки, регуляторы схватывания и твердения и др.).

Гипсовое сырье, кристаллизовавшееся в различных геологических условиях, обладает неодинаковыми свойствами. Опыт производства вяжущих тепловой обработкой гипсового камня показывает, что их свойства непосредственно связаны со структурой исходного дигидрата сульфата кальция. Они имеют различное строение, и продукты его переработки

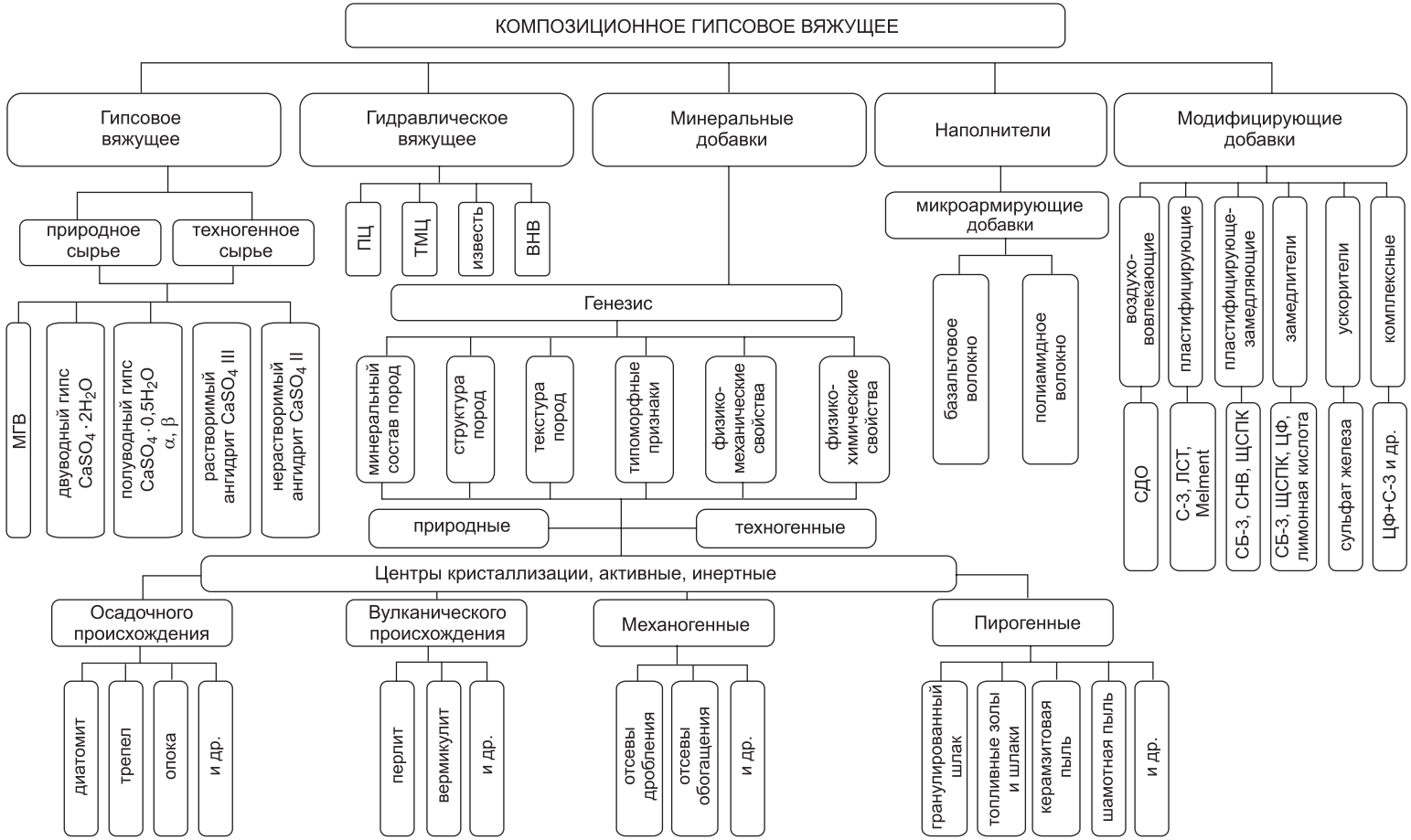



*Рис. 1.* Генетическая классификация сырья для производства композиционных гипсовых вяжущих

ведут себя по-разному. В работе [1] отмечается, что дигидрат сульфата кальция разного происхождения имеет в своем составе три типа воды: адсорбционную, структурную, цеолитную. В разных видах гипсового сырья соотношение типов воды различное, что объясняется анизотропией кристаллов гипса и различной природой химической связи в них.

Недостаточно изучено влияние важнейших типоморфных признаков сульфата кальция различного генезиса на гранулометрию, форму и морфологию поверхности, диспергирование частиц, механизм и кинетику гидратации сульфата кальция, структурно-текстурные характеристики гипсовых материалов, что очень важно для ранжирования гипсосодержащих материалов по степени эффективности их использования в качестве сырья для получения композитов.

Изучением кислотных свойств поверхности продуктов термообработки гипса в разное время занимались многие видные ученые. Было установлено, что соотношение сорбционных центров у продуктов термообработки гипсового сырья различного генезиса неодинаково, они проявляют различную каталитическую активность. При взаимодействии с водой продукты термообработки двуводного гипса по-разному поляризуют молекулы воды, изменяя кислотность среды. Можно выделить два типа поляризации молекул воды.

*1-й тип* — если поляризация воды происходит за счет свободных орбиталей иона $Ca^{+2}$, образующихся при неполном разрыве водородных связей, суспензия вяжущего подкисляется;

*2-й тип* — если поляризация воды происходит за счет образующихся при полном разрыве водородных связей ионов $SO_4^{-2}$, суспензия вяжущего приобретает щелочную среду.

Устойчивые фазы сульфата Са поляризуют воду за счет неподеленных электронных пар групп $SO_4^{-2}$ с отрывом ионов $H^+$ по схеме

$$2CaSO_4 + 2H - OH \rightarrow Ca(HSO_4)_2 + Ca(OH)_2. \quad (1)$$

Активные фазы сульфата Са поляризуют воду за счет свободных орбиталей ионов $Ca^{+2}$ с отрывом ионов $OH^-$ по схеме

$$2CaSO_4 + 2H - OH \rightarrow Ca(OH)_2SO_4 + H_2SO_4. \quad (2)$$

За счет образования слабых электролитов в первом случае в суспензиях уменьшается концентрация ионов $SO_4^{-2}$, а во втором — ионов $Ca^{+2}$. Поэтому активаторы, являющиеся донорами электронных пар, должны содержать избыток ионов $SO_4^{-2}$ и щелочную среду, а активаторы, являющиеся акцепторами электронных пар, — избыток ионов $Ca^{+2}$ и кислую среду.

Для определения влияния генезиса гипсового сырья на дефектность кристаллической решетки и свойства продуктов его термообработки предлагается способ и показатели (показатель совершенства структуры $K_g$ и показатель идентичности $K_i$), позволяющие ранжировать гипсовое сырье с учетом генезиса и структурных характеристик и прогнозировать свойства гипсовых вяжущих и материалов на их основе [1]. Показатель совершенства структуры вычисляется по результатам рентгенофазового анализа как величина, получаемая делением разности площадей рефлексов при $2\Theta = 29{,}09°$ ($d = 3{,}069$ Å) и $2\Theta° = 31{,}08°$ ($d = 2{,}876$ Å) на их сумму, а показатель идентичности — как величина, получаемая делением разности площадей рефлексов при $2\Theta = 20{,}68°$ ($d = 4{,}301$ Å) и $2\Theta° = 31{,}08°$ ($d = 2{,}876$ Å) на их сумму. Установлено, что для природных гипсов $K_g = 0{,}42...0{,}46$, а для техногенных — $K_g = 0{,}560...0{,}903$. Чем

выше значение $K_g$, тем менее совершенна кристаллическая структура гипса. При получении гипсовых вяжущих необходимо, чтобы показатель совершенства структуры $K_g$ был как можно ближе к $K_g$ природного гипса ($K_g$ = 0,42...0,46), а $K_i$ находился в интервале 0,38...0,41. В этом случае вяжущие вещества будут иметь наибольшую прочность.

Процессы, происходящие при гидратации и твердении гипсовых вяжущих, наглядно и информативно отображаются на кинетических кривых изменения pH и pCa, полученных потенциометрическим методом контроля процессов гидратации и твердения вяжущих веществ и имеющих различную форму. Величина pCa — характеристика суспензий, от которой зависит перекристаллизация гипса, величина pH — характеристика, от которой зависит растворимость сульфата кальция. Наиболее оптимальными являются условия гидратации, при которых величина pH в начальные сроки находится в слабокислой области (pH = 5,3...5,7), переходящей в дальнейшем в нейтральную среду. Причем установлено, что в щелочной среде влияние генезиса гипсового сырья несколько сглаживается, а в кислой среде, наоборот, усиливается. Все фазовые переходы сульфата Ca происходят в области максимальной концентрации положительно заряженных сорбционных центров. Поэтому при проектировании композиционных гипсовых вяжущих необходимо подбирать такие вещества, которые имели бы на своей поверхности избыток отрицательно заряженных сорбционных центров.

В Российской Федерации единой утвержденной в нормативной документации классификации природных и техногенных активных добавок не существует. Были разработаны минералогические основы повышения эффективности получения КГВ за счет использования новых для строительного материаловедения видов сырьевых ресурсов в качестве активных минеральных добавок (отходов горнорудного производства КМА), которые обладают повышенной внутренней энергией, способствующей как изменению процессов приготовления сырьевой смеси, так и синтезу композитов.

В работе [2] показано, что величина энергетической способности горных пород и породообразующих минералов существенно зависит от генезиса. Так, например, по составу, внутреннему строению и внешнему сложению отходы горнорудного производства КМА значительно отличаются повышенной активностью от традиционного, сходного по составу, сырья, используемого в строительной индустрии. Известно, что традиционные горные породы добывают в качестве сырья путем, как правило, открытой разработки сравнительно мелких карьеров, глубиной до 40...50 м. Между тем попутно добываемые породы, получаемые после обогащения руд, извлекаются из более глубоких месторождений (450...500 м). Геологические процессы способствовали естественной технологической активизации пород как потенциального сырья. Эта активизация выражается обычно в нарастании дефектности кристаллической решетки породообразующих минералов, частичной аморфизации породы и ее структурных зерен, которые претерпевают к тому же частичную или полную деструкцию с увеличением удельной и суммарной поверхности твердых частиц. Реакционная способность частиц тонкодисперсного кварца с корродированной поверхностью при деструкции им соответствующих минералов значительно повышается вследствие возрастания неупорядоченности (энтропии) кристаллических решеток. Это явление обусловлено соответствующим генезисом породы, а производственный эффект выражается в увеличении прочности такого материала по сравнению с применением обычного сырья.

В [3] утверждается, что физико-химические свойства природного сырья стройиндустрии (горных пород и минералов, их слагающих, либо техногенного сырья — отходов промышленности) зависят от его типоморфных признаков, которые определяются генезисом природного вещества, т.е. термодинамическими условиями их образования в различных слоях земной коры, условиями плавления и кристаллизации магм, последующими условиями и степенью метаморфизма и осадкообразования, либо от техногенеза, т.е. генезиса горных пород, условий и степени техногенных преобразований. Обладая информацией по характерным типоморфным признакам сырья того или иного генетического типа, можно без комплексных технологических исследований определять рациональные области использования сырья, расширять сырьевую базу стройиндустрии, разрабатывать нетрадиционные технологии производства строительных материалов, получать искусственные композиты с заранее заданными свойствами, снижать энергоемкость производства строительных материалов и т.д.

Согласно генетической теории выбора энергосберегающего сырья [2], приобретенная в процессе техногенных воздействий свободная внутренняя энергия, которой обладает техногенное сырье, уменьшает работу, которую необходимо выполнить человеку при производстве строительных материалов, т.е. механическую дезинтеграцию сырья (разрушение структуры и текстуры), разрушение кристаллических решеток минералов и синтез новообразований, определяющих эксплуатационные характеристики продукции стройиндустрии. Домол композиционных вяжущих совместно с наполнителем существенно повышает концентрацию активных центров типа кислотных центров Бренстеда и основных центров Льюиса на их поверхности. Кроме того, повышение тонкости помола вызывает механохимические процессы в вяжущих, благодаря чему поверхность составляющих их частиц аморфизируется. Особый интерес представляет техногенное сырье — отходы мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов (отходы ММС), отличающиеся от традиционно применяемого песка полиминеральным составом, а также наличием кварца трех генетических типов, включая более реакционноспособные разновидности.

В отходах ММС выделяют диагенетический кварц (халцедоновую разновидность слабоупорядоченного, высокореакционноспособного кварца) и две разновидности метаморфогенного кварца: более крупнозернистая (до 0,1 мм) (высокотемпературный тектонит) и менее крупнозернистая — низкотемпературный тектонит с невысокой степенью кристалличности. Изредка встречается контактово-метаморфический кварц с более высокой степенью кристалличности (рис. 2).

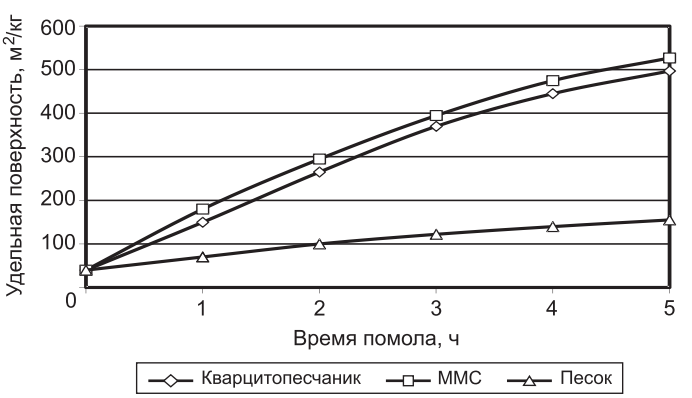



*Рис. 2.* Зависимость величины удельной поверхности наполнителей от времени помола

Отходы ММС состоят в основном из остроугольных изометрических агрегатов и отдельных частиц кварца — 68 %, магнетита — 4 %, гематита — 7 %, силикатов (амфиболов) — 12 % и карбонатов — 9 %. Модуль крупности отходов значительно меньше 1, около 80–85 % частичек размером меньше 0,074 мм, средневзвешенный диаметр 0,08...0,13 мм. Все породообразующие минералы отходов ММС имеют большое количество структурных дефектов, что позволяет ускорить и улучшить их взаимодействие с клинкерными минералами при формировании новообразований и приводит к созданию более плотного и прочного затвердевшего камня.

Исходя из современных представлений о механизме твердения гипсоцементно-кремнеземистых систем для повышения их долговечности необходимо обеспечить связывание большей части алюминатов с гипсом с образованием эттрингита в начальный период твердения системы с одновременным повышением степени гидратации портландцемента (например, механохимической активацией), а также поддержание концентрации гидроксида кальция на требуемом уровне в процессе твердения для обеспечения условий образования различных гидратных новообразований.

Экспериментально установлено, что минеральные добавки различного генезиса отличаются активностью при поглощении гидроксида кальция в твердеющей системе, размолоспособностью и гранулометрией тонкомолотых частиц, что существенно сказывается на физико-механических характеристиках затвердевших композитов с учетом разработанной технологии производства КГВ (табл. 1–3).

Таким образом, изучение влияния важнейших типоморфных признаков компонентов КГВ различного генезиса на их гранулометрию, форму и

Таблица 2

**Определение концентрации CaO в водной суспензии КГВ**

| Материал | | | Концентрация CaO в растворе, г/л, через | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| гипс, г | цемент, г | мин. добавка, г | 5 сут | | | 7 сут | | |
| | | | ГП | КВП | ММС | ГП | КВП | ММС |
| 4 | 2,5 | 0,625 | 1,21 | 1,23 | 1,03 | 0,85 | 1,08 | 0,83 |
| 4 | 2,5 | 1,25 | 1,16 | 1,21 | 0,98 | 0,83 | 0,99 | 0,81 |
| 4 | 2,5 | 2,5 | 1,1 | 1,13 | 0,9 | 0,82 | 0,93 | 0,78 |
| 4 | 2,5 | 3,75 | 1,05 | 1,1 | 0,85 | 0,8 | 0,86 | 0,74 |
| 4 | 2,5 | 5 | 0,98 | 1,08 | 0,8 | 0,78 | 0,81 | 0,72 |

Примечание. Здесь и в табл. 3 ГП — глауконитовый песок; КВП — кварцитопесчаник; ММС — отходы ММС.

Таблица 3

**Показатели свойств тонкомолотых минеральных добавок**

| Показатель | Минеральные добавки | | |
|---|---|---|---|
| | ММС | КВП | ГП |
| Удельная поверхность по ПСХ-2, $м^2/кг$ | 600 | 600 | 600 |
| Удельная поверхность на приборе Сорби-М (4-точечный метод БЭТ), $м^2/кг$ | 2960 | 2520 | 3260 |
| Объем пор с $R < 19{,}4$ нм, $м^3/кг$ | 0,000014 | 0,000012 | 0,000015 |

Таблица 4

**Физико-механические свойства КГВ (В/Вяж = 0,5)**

| Вид минеральной добавки | Удельная поверхность добавки, $м^2/кг$ | Подвижность, м | Сроки схватывания, с | | Предел прочности при сжатии, МПа, в сроки | | | | Коэф. размягчения, $K_р$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | начало | конец | 2 ч | 7 сут | 28 сут | сух. | |
| Отходы ММС | 600 | 0,175 | 540 | 720 | 5,5 | 12,75 | 16,8 | 22,0 | 0,78 |
| Кварцитопесчаник | 600 | 0,180 | 510 | 690 | 3,72 | 10,12 | 15,59 | 21,3 | 0,75 |
| Глауконитовый песок | 600 | 0,144 | 287 | 633 | 7,3 | 13,06 | 13,12 | 22,1 | 0,75 |

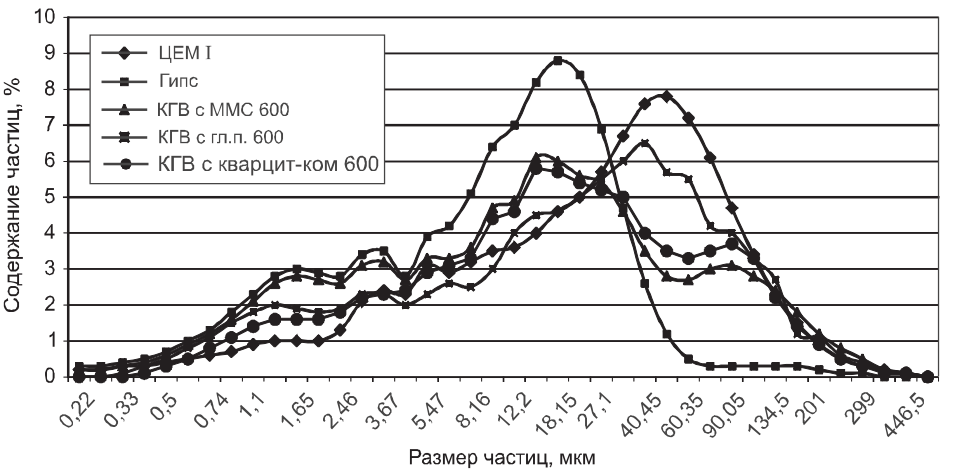



*Рис. 3.* Анализ гранулометрии компонентов КГВ

морфологию поверхности, диспергирование частиц, механизм и кинетику гидратации, структурно-текстурные характеристики имеет важное значение для ранжирования их использования по степени эффективности в качестве сырья для получения гипсосодержащих композитов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. Клименко, В.Г. Многофазовые гипсовые вяжущие [Текст] / В.Г. Клименко. — Белгород : Изд-во БГТУ, 2010. — 198 с.
2. Лесовик, В.С. Повышение эффективности производства строительных материалов с учетом генезиса горных пород [Текст] / В.С. Лесовик. — М. : Изд-во Ассоциации строит. вузов, 2006. — 526 с.
3. Строкова, В.В. Управление процессами синтеза строительных материалов с учетом типоморфизма сырья [Текст] / В.В. Строкова // Строит. матер. Прилож. «Наука», № 4. — М., 2004. — № 9. — С. 2–5.
4. Чернышева, Н.В. Гипсосодержащие композиты на техногенном сырье для стеновых материалов [Текст] / Н.В. Чернышева, М.Б. Нарышкина // Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий : Матер. V Междунар. конф. по гипсу. — Казань, 2010. — С. 110–115.



*ЛЕСОВИК Валерий Станиславович, д-р техн. наук, проф.*
*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*
*ЧЕРНЫШЕВА Наталья Васильевна, канд. техн. наук, доц.*
*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*
*КЛИМЕНКО Василий Григорьевич, канд. техн. наук, проф.*
*Белгородский инженерно-экономический институт (БИЭИ)*



Получено 02.03.12

**Lesovik Valery Stanislavovich**, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia
**Chernysheva Natalya Vasilyevna**, candidate of technical sciences, assistant professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia
**Klimenko Vasily Grigoryevich**, candidate of technical sciences, professor, Belgorod Engineering and Economic Institute (BIEI), Russia

## STRUCTURIZATION PROCESSES OF GYPSUMCONTAINING COMPOSITES TAKING INTO ACCOUNT RAW MATERIALS GENESIS

Classification of mineral raw materials for production of gypsumcontaining composites taking into account the typomorphic features of raw materials promoting forecasting of properties of materials at the level of a choice of initial components is offered, and also at synthesis of composites.

Key words: genesis raw materials, tipomorfnic signs, waste of a MMS.

REFERENCES

1. Klimenko, V.G. Multiphase Gypsum Knitting [Text] /V.G. Klimenko. — Belgorod : BSTU Publ. House, 2010. — 198 p.
2. Lesovik, V.S. Increasing of Production Efficiency of Construction Materials Taking Into Account Genesis of Rocks [Text] / V.S. Lesovik. — M. : Publ. House of Association of Construction Higher Education Institutions, 2006. — 526 p.
3. Strokova, V.V. Management of processes of synthesis of construction materials taking into account raw materials tipomorfizm [Text] / V.V. Strokova // Construction Mater. Science Appendix, N 4. — M., 2004. — N 9. — P. 2–5.
4. Chernysheva, N.V. Gypsumcontaining composites whith technogenic raw materials for wall constructions [Text] / N.V. Chernysheva, M.B. Naryshkina // Increase of Production Efficiency and Application of Plaster Materials and Products : Mater. V Intern. Conf. on Plaster. — Kazan, 2010. — P. 110–115.

УДК 691.51/.55

О.А. МИРЮК

# ВЛИЯНИЕ ЖЕЛЕЗИСТОГО КОМПОНЕНТА НА ТВЕРДЕНИЕ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Исследованы процессы гидратации и твердения магнезиального вяжущего с участием железистых минералов. Приведен состав продуктов гидратации.

Ключевые слова: каустический магнезит, оксид железа, андрадит, пирит, гидратация, твердение.

Ассортимент магнезиальных вяжущих расширяется за счет композиций, включающих каустический магнезит и дополнительный компонент природного или техногенного происхождения. Большинство сырьевых материалов имеет сложный химико-минеральный состав. Представляет интерес влияние железистых соединений, присутствующих в породах и отходах промышленности, на гидратацию и твердение магнезиальных композиций.

Цель работы — исследование смешанных магнезиальных вяжущих с различными железосодержащими компонентами.

Модельные вяжущие готовили из каустического магнезита ПМК-75, химических реактивов, природных минералов — составляющих основу скарновых пород и отходов обогатительных производств. Вяжущие затворяли раствором хлорида магния. Прочность камня вяжущего определяли на образцах размерами 20×20×20 мм, изготовленных из теста нормальной густоты. Фазовый состав затвердевших материалов оценивали дифрактометрическим и дифференциально-термическим методами. Структуру камня вяжущего исследовали с помощью электронной микроскопии.

Вяжущие из каустического магнезита и оксида железа характеризовались мольными соотношениями: $MgO : Fe_2O_3$ — 1:0; 3:1; 2:1; 3:2; 1:1; 1:2. Содержание $Fe_2O_3$ в смесях соответственно равно, %: 0; 57; 67; 73; 80; 89. Вяжущие затворяли раствором хлорида магния плотностью 1250 кг/м$^3$.

Характер твердения вяжущих зависит от содержания MgO (рис. 1, *а*). В отличие от каустического магнезита, композиции имели стабильный объем при твердении в воде (18 мес). Анализ дифрактограмм выявил, что с увеличением доли $Fe_2O_3$ ускоряется гидратация MgO. Полное преобразование MgO наблюдается в высокожелезистых составах (3:2; 1:1; 1:2) к 7-м сут твердения. По сравнению с вяжущими, содержащими $SiO_2$ и $Al_2O_3$, в композиции с $Fe_2O_3$ повышенная активность MgO (рис. 1, *б*). Непропорциональная количеству MgO степень упрочнения вяжущих свидетельствует о вкладе $Fe_2O_3$ в структурообразование. Степень превращения $Fe_2O_3$ в гидраты 5–18 %, наибольшие значения характерны для высокомагнезиальных составов (3:1; 2:1). Активность $Fe_2O_3$ при гидратации магнезиальных вяжущих можно объяснить предшествующей растворению оксида топохимической реакцией с растворенным в воде $MgCl_2$.

© Мирюк О.А., 2012

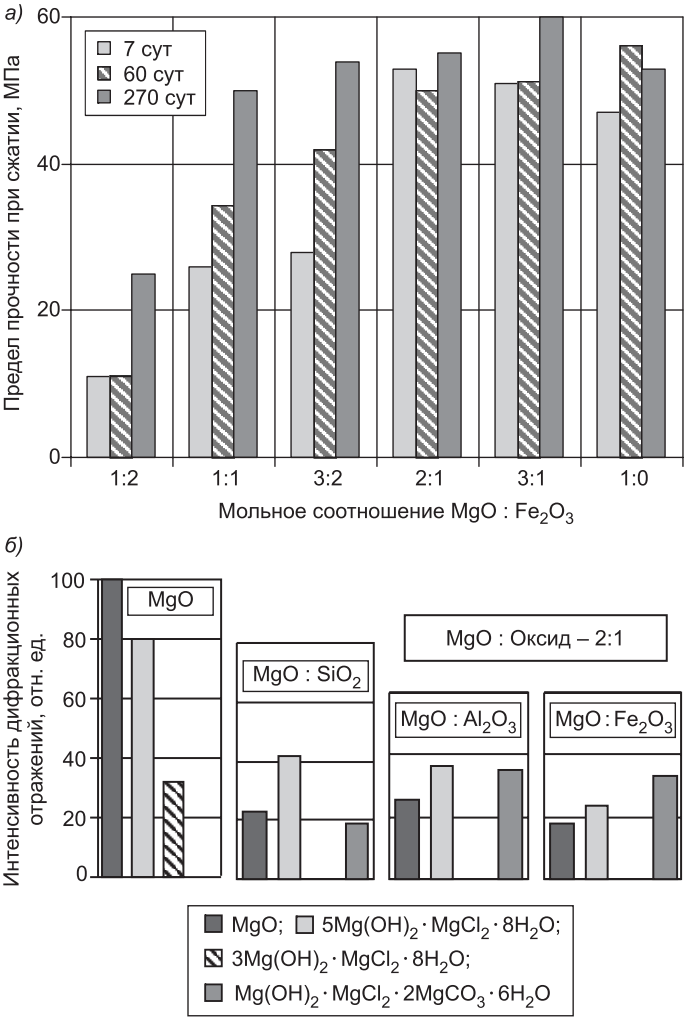



*Рис. 1*. Влияние вещественного состава на гидратационную активность вяжущих

*а*) влияние содержания оксида железа на упрочнение вяжущих; *б*) влияние состава оксида на содержание фаз после семи суток твердения

Состав кристаллогидратов камня вяжущих определяется соотношением компонентов (рис. 1, *б*). При гидратации смешанных вяжущих не идентифицирован тригидрооксихлорид магния $3Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$ (3-форма). Основу затвердевших вяжущих с $MgO : Fe_2O_3$ — 1:0; 3:1; 2:1 образует пентагидрооксихлорид магния $5Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$ (5-форма). Отличает гидратированные композиции гидрооксихлоркарбонат магния $Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 2MgCO_3 \cdot 6H_2O$. С течением времени содержание гидратного комплекса уменьшается, не вызывая деструктивных процессов; это подтверждает стабильное упрочнение большинства композиций. Основу аморфных фаз образует гидрооксид железа (эндоэффекты при 280 и 400 °С на рис. 2).

Высокой прочностью и водостойкостью отличаются вяжущие из $MgO$ и $Fe_3O_4$. Характер изменения фазового состава и свойств затвердевшей композиции во многом аналогичен композициям, содержащим $Fe_2O_3$. С увеличением концентрации $Fe_3O_4$ (рис. 2) уменьшается содержание пентагидрооксихлорида магния (эндоэффекты при 220 и 420 °С), возрас-

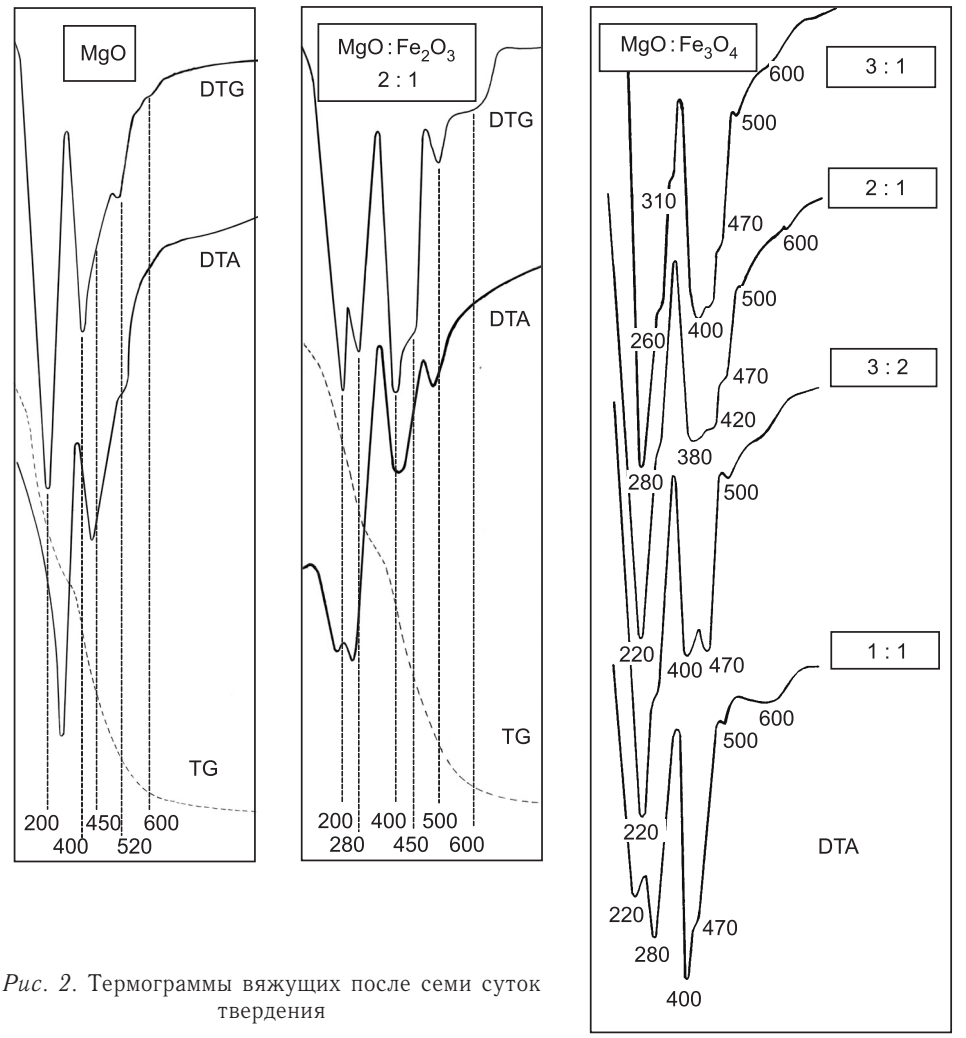



*Рис. 2.* Термограммы вяжущих после семи суток твердения

тает доля гидрооксихлоркарбоната магния (эндоэффекты при 280, 470 и 600 °С) и гидрооксида железа (эндоэффекты при 280 и 400 °С). При гидратации высокомагнезиального вяжущего образуется гидроферрит магния (эндоэффекты при 310 и 500 °С).

Исследование модельных магнезиальных вяжущих на основе минералов скарново-магнетитовых отходов выявило, что по степени участия в гидратообразовании минералы располагаются в ряду убывания: пирит, андрадит, эпидот, диопсид, альбит, скаполит, актинолит [1]. Активность минералов определяется их структурными и химическими особенностями и увеличивается с ростом способности к гидролитическому разложению в растворе $MgCl_2$. Примечательна наибольшая активность композиций с железосодержащими минералами островной структуры — андрадитом и пиритом.

Андрадит $Ca_3Fe_2[SiO_4]_3$ — распространенный минерал скарнов, обеспечивает стабильное твердение магнезиального вяжущего. Исследованы композиции с 30–60 % андрадита, использован затворитель с плотностью 1200...1280 кг/м$^3$. Прочностные показатели композиций более чувствительны к изменению концентрации хлорида магния, особенно в ранние сроки твердения. Максимальная прочность обеспечивается при затворе-

нии раствором $MgCl_2$ плотностью 1280 кг/м$^3$. Различие в показателях прочности до 40 %.

Основной гидратной фазой является $5Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$. Наибольшее количество $Mg(OH)_2$ в композициях с повышенной долей MgO и при использовании низкоконцентрированного раствора $MgCl_2$. Гидрат $Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 2MgCO_3 \cdot 6H_2O$ образуется после 1 сут твердения; при использовании затворителя с плотностью 1280 кг/м$^3$ содержание фазы к 7-м сут увеличивается вдвое. Интенсивному формированию гидрооксихлоркарбоната магния способствует увеличение соотношения $MgCl_2$ : MgO в вяжущем.

Степень преобразования андрадита в гидраты, определенная дифрактометрическим методом, к 7-м сут составила 20–23 %. На основе андрадита формируются гидрогранаты и гидросиликаты магния. В присутствии $MgCl_2$ возрастает ионная сила раствора, способствующая гидролизу андрадита $Ca_3Fe_2[SiO_4]_3$. В результате частичного или полного замещения тетраэдров $[SiO_4]$ группировкой $(OH)_4$ формируются гидрогранаты переменного состава $Ca_3Fe_2[SiO_4]_{3-x}(OH)_{4x}$ [2]. Поскольку природный андрадит образует серию твердых растворов с гроссуляром, возможно формирование гидроуграндита $(Ca, Mg, Fe)_3 \times (Fe, Al)_2[SiO_4]_{3-x}(OH)_{4x}$ [2]. Высвободившиеся ионы $[SiO_4]$ образуют гель кремнезема $Si(OH)_4$, связываются в гидросиликаты магния типа сепиолита. Общая схема вероятного преобразования андрадита:

$$Ca_3Fe_2(SiO_4)_3 + nMg^{2+} + (4x + 1)\,H_2O \rightarrow \rightarrow Ca_3Fe_2(SiO_4)_{3-x}(OH)_{4x} + nMgO \cdot xSiO_2 \cdot H_2O. \quad (1)$$

Ограниченное количество и слабая закристаллизованность гидратных образований на основе андрадита затрудняют их идентификацию. Дифракционные отражения ($d$ = 0,340; 0,285; 0,206; 0,170 нм), характерные для магнезиально-андрадитового камня (рис. 3), свидетельствуют о

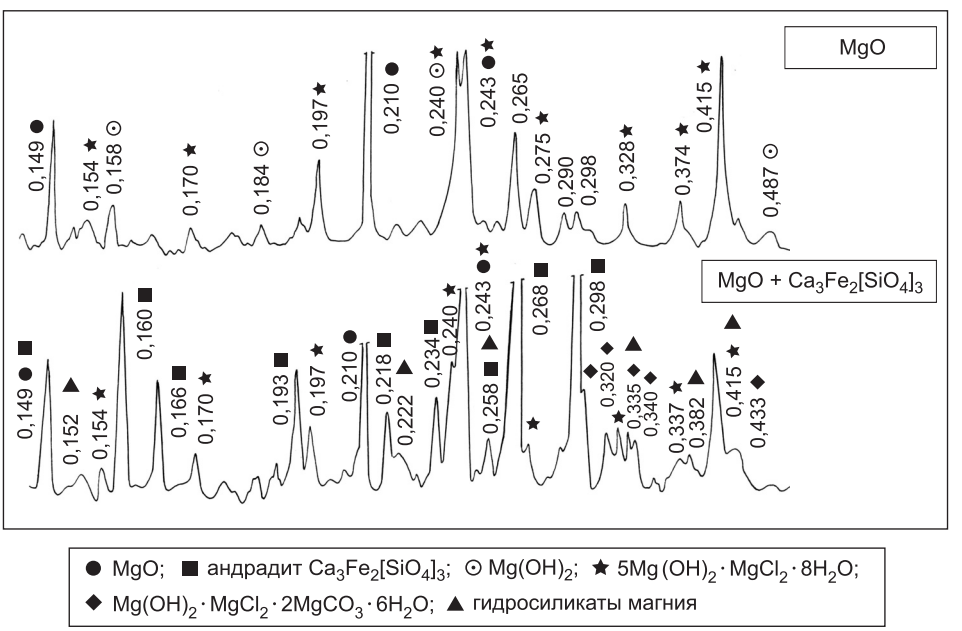



*Рис. 3.* Дифрактограммы вяжущих после 10 сут твердения

**Влияние пирита на состав и свойства смешанного магнезиального вяжущего**

| Содержание пирита, % | Интенсивность отражения фаз на дифрактограмме камня в возрасте 28 сут, отн. ед. | | | | | Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте, сут | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | MgO (0,210 нм) | $FeS_2$ (0,163 нм) | $Mg(OH)_2$ (0,157 нм) | 5-форма (0,197 нм) | 3-форма (0,830 нм) | 1 | 28 |
| 0 | 140 | Нет | 14 | 20 | 21 | 55 | 68 |
| 10 | 126 | 15 | 11 | 16 | 18 | 70 | 65 |
| 30 | 93 | 43 | 10 | 16 | 16 | 80 | 75 |
| 50 | 62 | 46 | 8 | 14 | 10 | 59 | 82 |
| 70 | 22 | 35 | 9 | 11 | Следы | 67 | 90 |
| 90 | Нет | 61 | Нет | Следы | Нет | 11 | 46 |

присутствии $Ca_3Fe_2(OH)_{12}$ (разновидность гидрограната при $x = 3$), стабильность структуры которого обеспечивается внедрением в его решетку небольшого количества $SiO_2$. Линии $d$ = 0,415; 0,382; 0,335; 0,258; 0,222; 0,152 нм указывают на присутствие в камне гидросиликатов магния (например, сепиолита).

Пирит $Fe[S_2]$ — распространенный сульфид земной коры. Исследованы композиции с различным содержанием пирита (см. таблицу). С ростом концентрации $Fe[S_2]$ увеличивается степень связывания MgO. В составе кристаллогидратов преобладает $5Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$, доля фазы возрастает с увеличением концентрации затворителя (рис. 4, *а*). Отражения $d$ = 0,799; 0,730; 0,412 нм указывают на образование $9Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 5H_2O$ при использовании высококонцентрированного раствора соли. В отличие от железосодержащих композиций при гидратации магнезиально-пиритного вяжущего не образуется гидрооксихлоркарбонат магния, что, по-видимому, обусловлено повышением кислотности среды. Изменения фазового состава продуктов твердения вызваны окислительно-восстановительными реакциями и гидролизом пирита в присутствии хлор-ионов. В гидратообразование вяжущего вовлекается 40–60 % пирита. Процессы гидролиза и окисления пирита, ускоренные в растворе $MgCl_2$, представлены схемой:

$$(Fe^{2+} + S_2^{2-}) + 3(H^+ + OH^-) + 4O_2 \rightarrow Fe(OH)_3 + 2(SO_4^{2-}) + 3H^+. \quad (2)$$

В результате образуется $Fe(OH)_3$, уплотняющий структуру камня. Соединение $FeSO_4$ активизирует MgO и участвует в гидратообразовании. Снижение доли гидрооксихлоридных комплексов в составе камня при сохранении высокой активности оксида магния обусловлено оттоком MgO в магнезиально-ферритные новообразования.

Экзотермический эффект при 550 °С характеризует окисление пирита (рис. 4, *б*). Эндотермический эффект при 640 °С свидетельствует о разложении гидрооксисульфата и, возможно, гидросульфоферрита магния.

Пентагидрооксихлорид магния сохраняется в композиции долгосрочного твердения. Микроконгломератное строение камня из частиц различной морфологии способствует уплотнению и повышению устойчивости структуры к деструктивным процессам (рис. 4, *в*).

**Выводы.** Реакционная способность железосодержащего компонента обеспечивает высокую активность магнезиальной композиции оксихло-

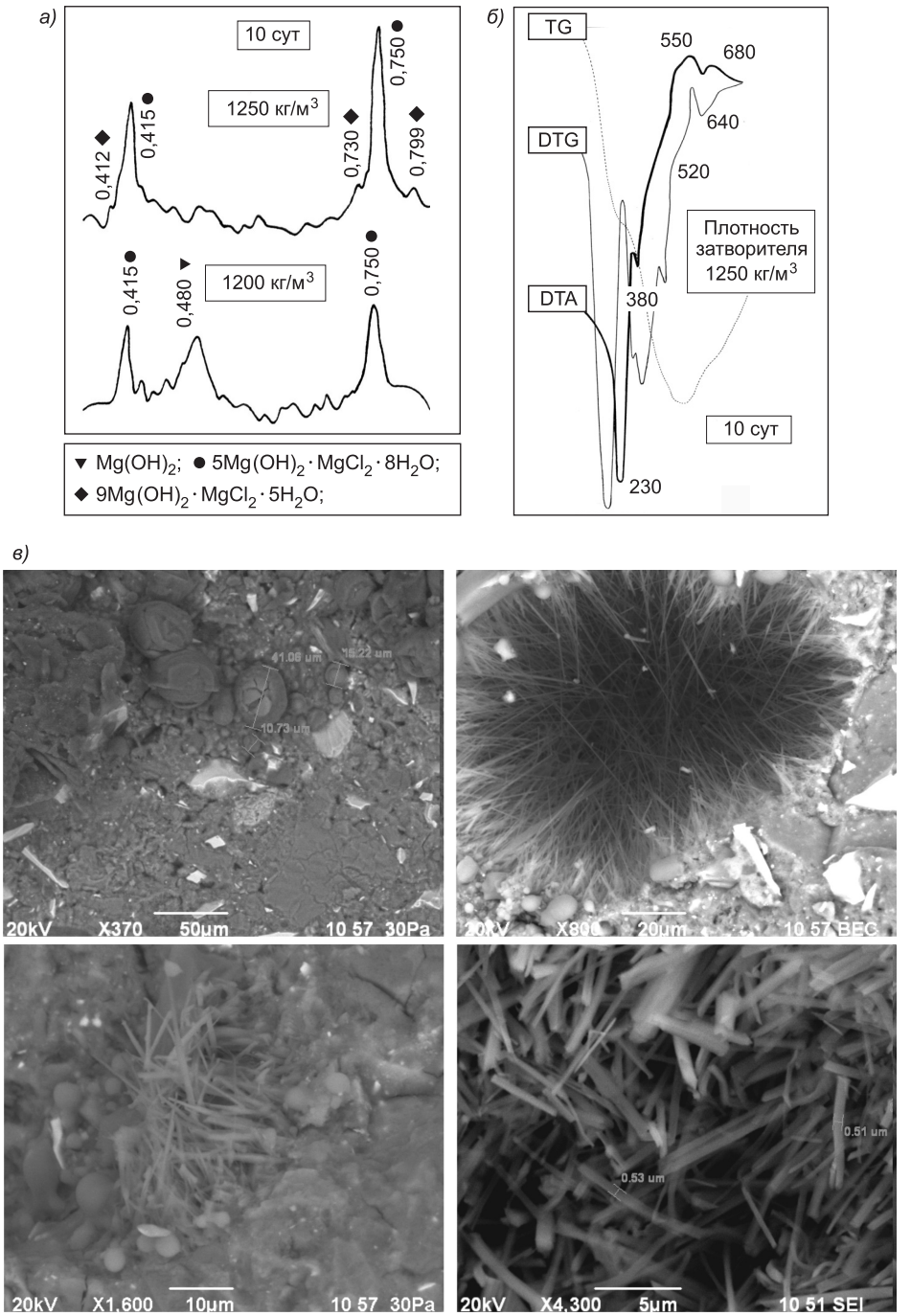



*Рис. 4.* Характеристики камня магнезиальной композиции с 70 % пирита
*а*) дифрактограммы композиции с различной плотностью затворителя; *б*) термограмма; *в*) микроструктура камня после 9 лет твердения

ридного твердения, многообразие кристаллических и гелевых гидратов. Оптимизация вещественного состава за счет железосодержащего компонента повысит эффективность смешанных магнезиальных вяжущих.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мирюк, О.А. Вяжущие вещества из техногенного сырья [Текст] / О.А. Мирюк, И.С. Ахметов. — Рудный : Рудн. индустр. ин-т, 2002. — 250 с.

2. Штрюбель, Г. Минералогический словарь [Текст] / Г. Штрюбель, З. Циммер. — М. : Недра, 1987. — 494 с.

*МИРЮК Ольга Александровна, д-р техн. наук, проф.; E-mail: psm58@mail.ru*
*Рудненский индустриальный институт, Казахстан*

Получено 30.03.12

**Miryuk Olga Alexandrovna**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: psm58@mail.ru
Rudny Industrial Institute, Kazakhstan

## INFLUENCE OF THE FERRIFEROUS COMPONENT ON HARDENING MAGNESIUM COMPOSITIONS

Processes on hidratation and hardening of magnesium binding with participation of ferriferous minerals are investigated. Composition of hidratation products is presented.

Key words: caustic magnesite, oxide of iron, andradite, pyrite, hidratation, hardening.

REFERENCES

1. Miryuk, O.A. Binders From Technogenic Raw [Text] / O.A. Miryuk, I.S. Akhmetov. — Rudny : Rudny Industrial Institute, 2002. — 250 p.
2. Shtrubel, G. The Mineralogical Dictionary [Text] / G. Shtrubel, Z. Tsimmtr. — M. : Nedra, 1987. — 494 p.

УДК 691.42 : 666.31

**В.Д. КОТЛЯР**

# ОСОБЕННОСТИ ПРЕСС-ПОРОШКОВ НА ОСНОВЕ ОПОК ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА

Приведена характеристика пресс-порошков, используемых при производстве керамических и огнеупорных изделий. Показаны особенности пресс-порошков на основе кремнистых опал-кристобалитовых пород — опок. Охарактеризованы их вещественный и фазовый состав, физические и технологические свойства, структурные особенности с учетом уровней отдельных слагающих компонентов и системы в целом. Дано обоснование, что пресс-порошки на основе опок могут быть выделены в отдельную самостоятельную группу.

Ключевые слова: опока, опоковидная порода, пресс-порошок, структура, вещественный состав, фазовый состав, сыпучесть, плотность.

Исследования, проводимые на протяжении последних лет в Ростовском государственном строительном университете, показали, что кремнистые опал-кристобалитовые породы — опоки являются перспективной сырьевой базой для производства изделий стеновой керамики во многих регионах России [1]. Учитывая особенности данного сырья, более приемлемым для них можно считать способ компрессионного формования изделий. Для успешного технологического управления качеством и эксплуатационными свойствами изделий в первую очередь необходимо знать физические и технологические свойства пресс-порошков на основе опок, их структурные особенности с учетом уровней отдельных слагающих компонентов и системы в целом.

Первые попытки классифицировать пресс-порошки для производства керамических и огнеупорных изделий были предприняты В.М. Ямом [2]. Согласно предложенной им классификации выделено пять групп пресс-порошков:

1) глинистые;

2) на основе грубозернистых непластичных материалов и глиняной связки;

3) грубозернистые из непластичных материалов;

4) тонкокерамические глинистые;

5) безглинистые высокодисперсные порошки.

Более подробное развитие данная классификация получила в работах Р.Я. Попильского, Ю.Е. Пивинского, Ф.В. Кондрашова [3, 4], где на основании минералогического и зернового состава пресс-порошков и с учетом важнейших областей применения было также выделено пять групп.

*К первой группе* относятся глинистые порошки, получаемые путем измельчения природных глин (каолинов, суглинков и т.д.). Особенности этой группы порошков заключаются в их отличии по минералогическому составу, природной дисперсности, пластичности, формовочной влажности и степени измельчения. Формовочная влажность составляет 7–13 %.

© Котляр В.Д., 2012

Давление прессования 5...25 МПа. Основные области использования порошков данной группы — производство кирпича и плитки.

*Вторую группу* составляют порошки на основе крупнозернистых непластичных материалов и глинистой связки. Содержание непластичных составляющих 30–85 %. Зерновой состав непластичного материала 0...5 мм. В качестве связки применяют пластичные огнеупорные глины. Влажность прессуемых порошков 5–10 %. Давление прессования 20...100 МПа. Основная область применения порошков данной группы — производство алюмосиликатных огнеупоров и некоторых видов кислотоупоров.

*Третью группу* составляют крупнозернистые порошки из непластичных материалов, природных или искусственных. От порошков второй группы они отличаются отсутствием связующего глинистого компонента. От последнего обстоятельства существенно зависит выбор способа подготовки масс и процесс их прессования. Прессование осуществляют при влажности 2,5–7,0 % и давлении 30...200 МПа. Порошки данной группы используют преимущественно для производства соответствующих огнеупоров.

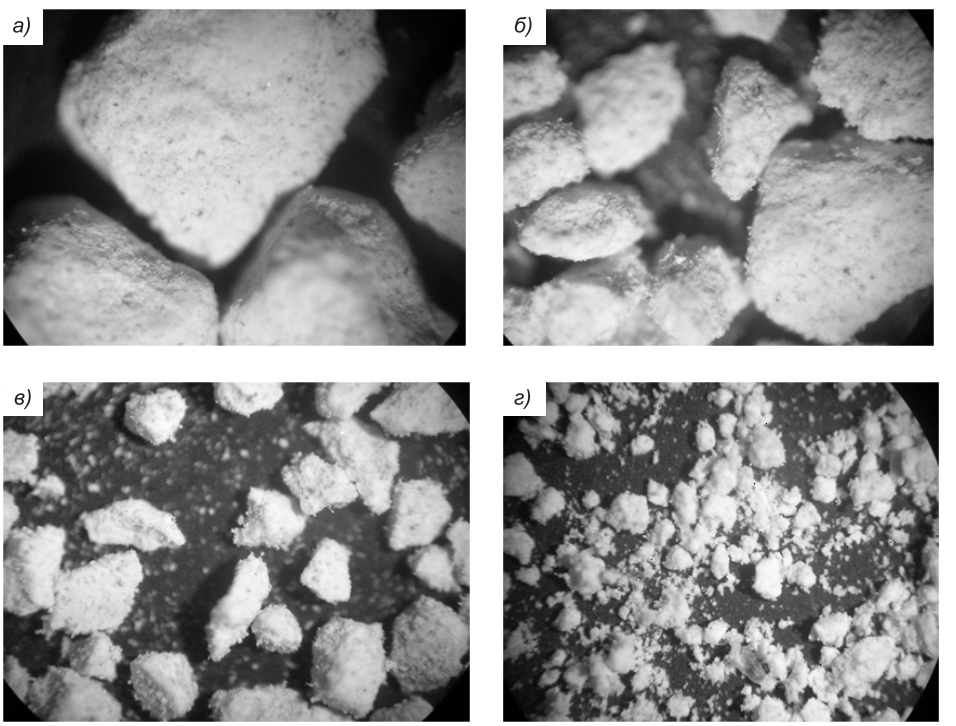
*К четвертой группе* относятся тонкокерамические глинистые пресс-порошки (или порошки из тонкокерамических масс на глинистой связке). Характерной особенностью их состава является сочетание глинистых компонентов с тонкоизмельченными непластичными материалами. Содержание глинистых компонентов составляет в основном 20–60 %. Влажность пресс-порошков 6–12 %, давление прессования 15...80 МПа. Глинистые тонкокерамические порошки применяют в производстве изделий тонкой строительной керамики и плитки различного назначения.

*К пятой группе* относятся пресс-порошки на основе тонкоизмельченных непластичных минеральных компонентов. К числу минеральных компонентов, используемых в порошках данной группы, относятся многие оксиды, химические соединения, а также разнообразные спеки, стекла и т.д. Компоненты данной группы обычно измельчают до размеров зерен от долей микрометра до десятков микрометров. Связкой при прессовании порошков данной группы являются водные растворы органических соединений (декстрин, поливиниловый спирт и др.), безводные органические связки, как жидкие, так и твердые термопластичные, термореактивные. В связи с большим разнообразием свойств и назначений порошков данной группы содержание связки в них колеблется от 2–3 до 20–25 % по массе, а давление прессования — от 50 до 200 МПа (иногда и более). Порошки пятой группы используют при получении весьма разнообразных изделий технической керамики.

Анализируя порошки на основе опоковидных пород, можно констатировать, что они ни по вещественному составу, ни по структуре и технологическим свойствам не похожи ни на одну из перечисленных выше пяти групп пресс-порошков. По некоторым признакам пресс-порошки на основе опоковидных пород схожи с пресс-порошками первой, второй и третьей групп, однако отличительных признаков все же больше.

*Вещественный состав*. По вещественному составу пресс-порошки на основе опоковидных пород весьма разнообразны. И если по химическому составу можно найти сходство с суглинками, сухарными глинами, алевритистыми глинами, глинистыми сланцами, то по минералогическому составу имеются значительные отличия. Главной особенностью является наличие опала, опал-кристобалита различной степени структурного совершенства. В принципе вещественный состав пресс-порошков аналогичен исходному составу опоковидных пород и может классифицироваться так же, как и сами породы.

*Структурные особенности*. Значительные отличия пресс-порошков на основе опок от глинистых пресс-порошков имеются по структурным характеристикам. По микроструктуре частицы пресс-порошков подразделяют на гранулы и зерна. Зерном называют частицу, которая состоит либо из более мелких достаточно прочно соединенных друг с другом частиц, имеющих достаточно различимую на микроуровне границу и отличающихся составом, либо состоящую из одной отдельной частицы мономинерального состава. Порошки на основе опоковидных пород состоят из зерен полиминерального состава. Об их абсолютных размерах можно судить как по собственно гранулометрическому составу кремнистых опоковидных пород, так и по размерам зерен, полученных в процессе подготовки формовочных масс. В процессе подготовки пресс-порошков не достигается абсолютной диспергации на отдельные первичные мономинеральные зерна. Это подтверждается как нашими исследованиями, так и результатами других исследователей. Кроме того, отдельные зерна имеют высокую микропористость, достигающую 40–55 %. Эффективный диаметр пор составляет до 0,01...0,1 мкм. В зависимости от требуемой влажности пресс-порошка поры могут быть заполнены частично или даже полностью жидкой фазой. Высокая пористость зерен способствует быстрому выравниванию влажности пресс-порошков, а также быстрому удалению воздуха при прессовании, что в значительной мере снижает его запрессовку. Зерна пресс-порошков, как установлено, практически не разрушаются в процессе прессования. Определение зернового состава до и после прессования при давлении до 50 МПа показало его значительную схожесть. В процессе подготовки пресс-порошков отмечена определенная закономерность — зерна фракций больших размеров, как правило, имеют более окатанную поверхность. На рисунке представлены фотографии отдельных зерен пресс-порошка на основе опоки Авило-Федоровского месторо-




Отдельные зерна пресс-порошка различных фракций, мм:
*а*) 1,25...2,5; *б*) 0,63...1,25; *в*) 0,315...0,63; *г*) 0,16...0,315. Увеличение 6,3×21

ждения. Окатанная поверхность зерен снижает в значительной степени внутреннее и внешнее трение при прессовании.

Существенная особенность строения большинства керамических пресс-порошков заключается в том, что они состоят не из отдельных минеральных «первичных» частиц, достаточно подвижных относительно друг друга, а из явно выраженных гранул. Типичные гранулы керамических порошков обладают достаточной прочностью, плотностью и определенными пластическими свойствами. Механизм их образования связан главным образом со склеивающим действием той или иной связующей жидкости. Гранулой называют частицу, которая состоит из более мелких отдельных зерен, соединенных в основном за счет технологической связки. Некоторые исследователи используют такое понятие, как «агрегат», что очень близко к понятию «гранула». Однако в промышленности стеновой керамики чаще используют понятие «гранула». Отдельные зерна внутри гранулы также удерживаются вместе, помимо жидких прослоек технологической связки (воды или водных растворов ПАВ и других веществ), за счет сил Ван-дер-Ваальса, электростатических сил, твердотельных мостиков и т.д. В порошках на основе опоковидных пород, даже в сухом состоянии, более мелкие частицы агрегируются вокруг более крупных. Увеличение влажности способствует большей агрегации зерен. Гранулы на основе опоковидных пород имеют малую структурную прочность. Прочность гранул с увеличением влажности повышается до определенного предела. Гранулы на основе глинистых разновидностей опок обладают большей прочностью. Разрушение гранул при прессовании происходит в первые моменты приложения нагрузки, и далее для большего уплотнения ведущую роль играет зерновой состав.

Соотношение размера зерен и гранул в пресс-порошке оказывает определенное влияние на свойства как сырцовых, так и обожженных изделий. Обычно технологическая задача сводится к получению порошков с максимальной насыпной плотностью и минимальной пустотностью. Многие исследователи рекомендуют для достижения максимальной насыпной плотности пресс-порошка гранулометрический состав полифракционного состава. Многими опытами и расчетами доказано, что такие порошки имеют гораздо большую плотность укладки в сравнении с монофракционными, т.е. состоящими из гранул одного размера. При этом различают два основных принципа подбора укладок:

— непрерывистые укладки, основанные на заполнении объема гранулами и зернами всех размеров — от некоторой верхней границы до минимальных размеров («близких к нулю»);

— прерывистые укладки, т.е. такие, при которых между зернами и гранулами заданных фракций промежуточные фракции отсутствуют. При этом зерна самой крупной фракции образуют скелет, пустоты которого заполняются следующей фракцией. Более мелкие пустоты заполняются следующей фракцией и т.д.

Наиболее плотными являются порошки с прерывистым зерновым составом. Однако на практике это труднодостижимо, так как требуется производить неоднократный рассев порошка и его пофракционное дозирование.

Говоря о главных структурных признаках (абсолютные и относительные размеры зерен и гранул, их форма, соотношения и т.д.) пресс-порошков на основе опок и их отличиях от других видов пресс-порошков, выделяют следующие структурные особенности, которые можно разделить на несколько уровней:

— структурные характеристики первого уровня — это форма, размеры, количество тех или иных «первичных» зерен породы (опал, глинистые минералы, кварц, кальцит, полевые шпаты, глауконит и т.д.);

— структурные характеристики второго уровня — это размер и форма зерен, полученных в результате измельчения исходной породы. Зерна «второго» уровня состоят из достаточно прочно соединенных зерен «первого» уровня с наличием определенной пористости (форма, количество, размеры пор). Размеры и форма зерен в основном зависят от условий технологической переработки;

— структурные характеристики третьего уровня — это отдельные гранулы, состоящие из зерен «второго» уровня, удерживаемых вместе за счет различных сил. При этом гранулы также обладают своей межзерновой пористостью. Гранулы отличаются малой структурной прочностью. Поры зерен «второго» уровня, так же как и поры гранул, могут быть в различной степени заполнены влагой;

— структурные характеристики четвертого уровня — это собственно пресс-порошок, состоящий из гранул различного размера и преимущественно окатанной формы. Размеры гранул в основном обусловлены особенностями технологической подготовки пресс-порошка, который также характеризуется пустотностью.

Безусловно, реальные пресс-порошки могут состоять только из гранул — при повышенной влажности, из гранул и зерен — при средней влажности и только из зерен — это сухие порошки с минимальной влажностью. Данная характеристика пресс-порошков по структурным признакам на основе опок носит в определенной мере условный характер, однако она поможет оценить взаимосвязь между различными элементами системы в целом и дать объяснения некоторым важным технологическим вопросам. Поскольку гранулы пресс-порошка разрушаются в самый первый период прессования, при минимальных удельных давлениях, для достижения наибольшей плотности прессовок первостепенное значение имеет не гранулометрический, а зерновой состав пресс-порошка. И к достижению оптимальных зерновых составов пресс-порошков необходимо стремиться.

*Фазовый состав, физические и технологические свойства.* Фазовый состав, физические и технологические свойства пресс-порошков непосредственно связаны между собой. К важнейшим из них относятся насыпная плотность, пустотность, сыпучесть и прессуемость.

Насыпная плотность пресс-порошков на основе опок значительно ниже в сравнении с суглинками и глинами и изменяется в достаточно широких пределах — от 700 до 1000 кг/м$^3$. Значения насыпной плотности в основном определяются вещественным составом исходной породы — порошки на основе глинистых, карбонатных опок обладают повышенной плотностью, а порошки на основе малоглинистых опок имеют меньшую плотность. Насыпная плотность пресс-порошков закономерно снижается с повышением дисперсности, под которой мы понимаем степень раздробленности вещества. Чем меньше размер частиц в порошке, тем выше его дисперсность. С увеличением влажности пресс-порошка насыпная плотность вначале возрастает, в этот период идет насыщение зерен влагой, а затем по мере агрегирования зерен в гранулы и с увеличением пустотности между гранулами начинает снижаться. Насыпная плотность не есть строго постоянная величина. Даже при небольших вибрациях насыпная плотность порошка возрастет. Поэтому различают насыпную плотность в свободно насыпанном состоянии и с утряской. Насыпная плотность с утряской может значительно (на 20–40 %) превышать насыпную плот-

ность в свободно насыпанном состоянии. При этом более сухие порошки на основе опок в большей мере поддаются утряске.

Фазовый состав керамических пресс-порошков на основе опок изменяется в широких пределах и определяется дисперсностью, составом и структурой частиц твердой фазы, зерновым составом и влажностью. Если принять истинную плотность опок в среднем около 2,40 г/см$^3$, то для сухих порошков содержание газовой фазы будет составлять 60–70 %. Это значительно больше в сравнении с глинистыми порошками, однако следует учесть, что 40–60 % газовой фазы приходится на пористость «вторичных» зерен, которые не разрушаются при прессовании и газовая фаза или жидкая фаза в них сохраняется. Межзерновая и межгранульная пустотность, определяющая содержание газовой фазы, удаляемой в процессе прессования у пресс-порошков на основе опок, остается такой же, как у глинистых пресс-порошков.

Обобщая исследования по фазовому составу пресс-порошков на основе опок, можно говорить, что основную долю объема занимает поровый воздух вторичных зерен (газообразная фаза), содержание которого составляет 0,6–0,7 частей объема у сухих порошков. По мере увеличения влажности пресс-порошков на основе опок, которая может достигать 30 и даже 35 %, содержание газообразной фазы может снижаться до 0,3–0,5 частей объема. Содержание твердой фазы остается неизменным. Следует сказать, что значения фазовых характеристик пресс-порошка даже для одного и того же сырья могут в больших пределах колебаться. Это обусловлено многими факторами.

Важной характеристикой пресс-порошков является сыпучесть, которая характеризует его способность к равномерному заполнению объема пресс-формы, что очень важно при прессовании пустотного и фигурного кирпича. Сыпучесть пресс-порошка оценивают по углу естественного откоса между горизонтальной плоскостью и образующей конуса, насыпанного из исследуемого материала, и по количеству порошка, просыпавшегося под действием собственной массы в единицу времени через отверстие определенного размера. Чем меньше угол, тем больше сыпучесть. Для большинства керамических пресс-порошков угол естественного откоса находится в пределах от 25 до 45°. Проведенные эксперименты показали, что в подавляющем большинстве случаев пресс-порошки на основе опок попадают в эти значения. В целом же можно говорить, что пресс-порошки на основе опок за счет меньшей насыпной плотности обладают худшей сыпучестью, однако во многом она определяется влажностью, и по этой характеристике они примерно одинаковы с пресс-порошками для производства облицовочной плитки, получаемыми мокрым способом, с сушкой и грануляцией в башенных распылительных сушилах.

Анализируя особенности пресс-порошков на основе опок по вещественному составу, структуре и физико-технологическим свойствам, их можно выделить в отдельную группу. При этом необходимо учесть, что они не являются абсолютно противоположными по своим свойствам в сравнении с другими группами пресс-порошков. Некоторые признаки схожи, некоторые отличаются. В процессе накопления фактических данных возникнет необходимость самостоятельной дополнительной классификации пресс-порошков на основе опоковидных пород.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Котляр, В.Д. Опоки — перспективное сырье для стеновой керамики [Текст] / В.Д. Котляр, Б.В. Талпа // Строит. материалы. — 2007. — № 2. — С. 31–33.

2. Ям, В.М. Производство огнеупоров [Текст] / В.М. Ям // Тр. ВИО. — Вып. 36. — М., 1964. — С. 161–180.
3. Попильский, Р.Я. Прессование керамических порошков [Текст] / Р.Я. Попильский, Ф.В. Кондрашов. — М. : Металлургия, 1968. — 272 с.
4. Попильский, Р.Я. Прессование порошковых керамических масс [Текст] / Р.Я. Попильский, Ю.Е. Пивинский. — М. : Металлургия, 1983. — 176 с.

*КОТЛЯР Владимир Дмитриевич, канд. техн. наук, доц.*
*Ростовский государственный строительный университет, г. Ростов-на-Дону*

Получено 21.02.12

**Kotlyar Vladimir Dmitrievich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Rostov State Construction University, Rostov-on-Don, Russia

## FEATURES PRESS POWDER BASED FLASKS AT PRODUCTION OF CERAMIC BRICK

The characteristic of the press powders used in the manufacture of ceramic-ray and refractory products. The features of the press powders on the basis of silica opal-cristobalite rocks-flasks. Characterized by their real and phase composition, physical and technological properties, structural characteristics, taking into account the levels of individual constituent components and systems in general. The substantiation of that molding powders based on the flasks can be isolated in a separate group.

Key words: flask, opokovidnaya breed, press powder, structure, material composition, phase composition, flowability, density.

REFERENCES

1. Kotlyar, V.D. Flask — a promising raw material for ceramic wall [Text] / V.D. Kotlyar, B.V. Talpa // Building Materials. — 2007. — N 2. — P. 31–33.
2. Yam, V.M. Production of refractory [Text] / V.M. Yam // Proc. of the SIV. — N 36. — M., 1964. — P. 161–180.
3. Popilsky, R.Ya. Pressing Ceramic Powders [Text] / R.Ya. Popilsky, F.V. Kondrashov. — M. : Metallurgy, 1968. — 272 p.
4. Popilsky, R.Ya. Pressing Powdered Ceramic Materials [Text] / R.Ya. Popilsky, Yu.E. Pivinsky. — M. : Metallurgy, 1983. — 176 p.

УДК 691.327 : 666.972.7

А.А. САГРАДЯН, Г.А. ЗИМАКОВА

# ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКОЙ, ВКЛЮЧАЮЩЕЙ ЗОЛЬНЫЕ МИКРОСФЕРЫ

В работе отражены результаты исследования свойств тяжелого бетона, модифицированного органоминеральной добавкой, включающей зольные микросферы. Установлено, что зольные микросферы оказывают положительное влияние на прочность бетона, что обусловлено наличием пуццоланической активности, подтвержденной методами дифференциально-термического анализа и растровой микроскопии. Отмечено также положительное влияние зольных микросфер на удобоукладываемость, морозостойкость, водонепроницаемость бетона.

Ключевые слова: зольные микросферы, пуццоланическая активность, тяжелый бетон.

Органоминеральные добавки получают, объединяя в единую систему активный минеральный компонент и органический модификатор. Применение органоминеральных добавок, состоящих из суперпластификатора и микрокремнезема, позволяет получать бетоны, характеризующиеся высокой прочностью и долговечностью. Одним из недостатков микрокремнезема как активного минерального компонента является его отрицательное влияние на удобоукладываемость.

Зольные микросферы (ЗМС) представляют собой полые частицы сферической формы диаметром 10...1000 мкм, химический состав которых представлен в основном следующими оксидами (мас. %): $SiO_2$ — 50–65 %, $Al_2O_3$ — 20–30 %, $Fe_2O_3$ — 3–8 %, CaO — 1–5 %, MgO — 0–4,5 %, $TiO_2$ — 0,5–1,5 %, $K_2O$ — 0,5–7 %, $Na_2O$ — 0,5–1,5%, MnO — 0–0,5 %, $P_2O_5$ — 0–0,5 %, $SO_3$ — 0–2,5 % [1]. Содержание CaO менее 10 % позволяет отнести ЗМС к кислым золам по ГОСТ 25818–91, модуль активности $M_a = Al_2O_3/SiO_2 = 0{,}31...0{,}63$. Зольные микросферы характеризуются низкой водопотребностью и, в отличие от других минеральных добавок, как правило, не ухудшают удобоукладываемость бетонных смесей [2]. Поэтому имеются основания предположить, что в сочетании с гиперпластификатором и микрокремнеземом ЗМС могут быть эффективным компонентом органоминеральной добавки, обладающим рядом положительных эффектов. Во-первых, это улучшение реологических характеристик за счет водоредуцирующего действия пластификатора и ЗМС. Во-вторых, возможное наличие у ЗМС пуццоланических свойств создает предпосылки к использованию их в качестве активного компонента.

Изучение влияния ЗМС в составе органоминеральной добавки, включающей также микрокремнезем МК-85 (МК) и гиперпластификатор МС Bauchemie Muraplast FK.63 (Д), проводилось на 14 экспериментальных составах с варьированной дозировкой ЗМС и В/Ц. Водоцементное отношение для составов 1–7 принято 0,32, для изучения влияния добавки

© Саградян А.А., Зимакова Г.А., 2012

**Результаты эксперимента**

| № образца | ЗМС, кг | Состав на 1 м$^3$ | | | | | | В/Ц | $R_{сж}$, МПа | $F$, марка | $W$, марка | Жесткость, с |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Ц, кг | МК, кг | Песок, кг | Щебень, кг | Вода, л | Д, кг | | | | | |
| 1 | 0 | 400 | 100 | 707 | 1153 | 128 | 4 | 0,32 | 94,0 | 500 | 10 | 4 |
| 2 | 10 | 400 | 100 | 707 | 1153 | 128 | 4 | 0,32 | 106,0 | 500 | 10 | 3,5 |
| 3 | 20 | 400 | 100 | 707 | 1153 | 128 | 4 | 0,32 | 112,0 | 500 | 10 | 3 |
| 4 | 30 | 400 | 100 | 707 | 1153 | 128 | 4 | 0,32 | 108,0 | 500 | 10 | 2,75 |
| 5 | 40 | 400 | 100 | 707 | 1153 | 128 | 4 | 0,32 | 86,2 | 500 | 12 | 2,5 |
| 6 | 60 | 400 | 100 | 707 | 1153 | 128 | 4 | 0,32 | 79,2 | 600 | 12 | 2,5 |
| 7 | 80 | 400 | 100 | 707 | 1153 | 128 | 4 | 0,32 | 79,2 | 600 | 12 | 2,4 |
| 8 | 0 | 400 | 100 | 707 | 1153 | 160 | 4 | 0,4 | 75,6 | 400 | 6 | — |
| 9 | 10 | 400 | 100 | 707 | 1153 | 160 | 4 | 0,4 | 80,1 | 400 | 6 | — |
| 10 | 20 | 400 | 100 | 707 | 1153 | 160 | 4 | 0,4 | 83,1 | 400 | 8 | — |
| 11 | 30 | 400 | 100 | 707 | 1153 | 160 | 4 | 0,4 | 79,4 | 400 | 8 | — |
| 12 | 40 | 400 | 100 | 707 | 1153 | 160 | 4 | 0,4 | 70,4 | 500 | 8 | — |
| 13 | 60 | 400 | 100 | 707 | 1153 | 160 | 4 | 0,4 | 66,2 | 500 | 8 | — |
| 14 | 80 | 400 | 100 | 707 | 1153 | 160 | 4 | 0,4 | 59,8 | 500 | 8 | — |

ЗМС на подвижные смеси изготовлены составы 8–14 с В/Ц, равным 0,4. В эксперименте использовался цемент ЦЕМ I 42.5 Н (Ц).

Результаты испытания образцов-кубов 100 × 100 × 100 мм на прочность $R_{сж}$ в возрасте 28 сут, марка по водонепроницаемости $W$ (определялась на приборе АГАМА-2Р по ГОСТ 12730.5), марка по морозостойкости $F$ (определялась ускоренным дилатометрическим методом по ГОСТ 10060.3) и дозировка компонентов представлены в таблице. Графическая зависимость влияния дозировки ЗМС на прочность материала представлена на рис. 1. Для составов с В/Ц = 0,32 определялась жесткость по методу Красного (ГОСТ 10181).

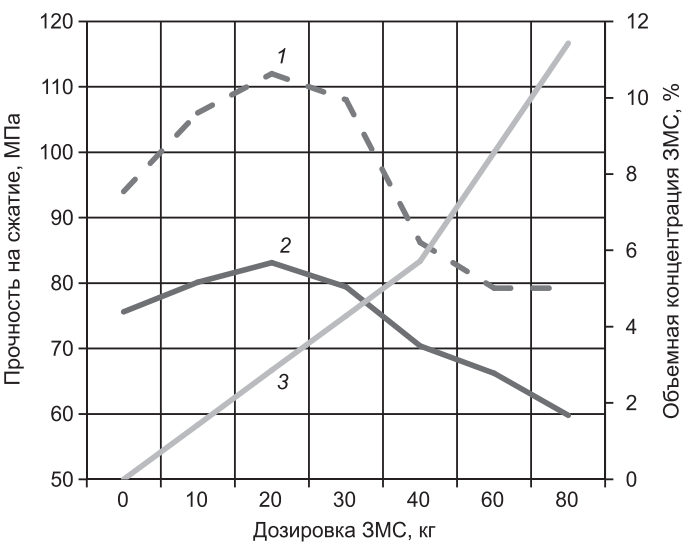



*Рис. 1.* Зависимость между прочностью и дозировкой ЗМС
*1* — прочность при В/Ц = 0,32; *2* — прочность при В/Ц = 0,4; *3* — объемная концентрация ЗМС

Для составов с В/Ц = 0,32 при введении добавки ЗМС может быть достигнуто увеличение прочности до 19 % (для состава № 3) по сравнению с составом № 1. Для составов с В/Ц = 0,4 прирост прочности достигает 10 % (для состава № 10) по сравнению с контрольным бездобавочным составом (состав № 8). Увеличение дозировки ЗМС более 7,5 % от массы цемента приводит к снижению прочности бетона: для составов с В/Ц = 0,32 сброс прочности достигает 16 %, для В/Ц = 0,4 – 22 % (при дозировке ЗМС 20 % от массы цемента).

Характер изменения прочности бетона с добавкой ЗМС обусловлен следующими факторами. Во-первых, ЗМС обладают собственной пуццоланической активностью. Наличие пуццоланической активности, т.е. способности ЗМС связывать $Ca(OH)_2$, образующийся при гидратации минералов портландцемента, в CSH-фазу, подтверждена результатами дифференциально-термического анализа (ДТА) и термогравиметрического анализа (ТГ) (проводился на установке Netzsch STA 449 F3 Jupiter, режим работы: диапазон температур 20...1000 °С, скорость нагревания 10 °С/мин) и растрово-электронной микроскопии (РЭМ) (проводилась на микроскопе JEOL JSM-6460 LV) цементного камня с добавкой ЗМС при соотношении цемента и ЗМС 10 : 2 по массе при В/Ц = 0,32 в возрасте 1,7 и 90 сут (рис. 2).

Анализ результатов ДТА и ТГ позволил установить, что термический эффект на 500 °С, сопровождающийся потерей массы, характерный для разложения $Ca(OH)_2$, наблюдается у всех образцов, однако с увеличением сроков твердения отмечено значительное снижение площади эффекта. Эффект на 800 °С, при котором термогравиметрические кривые также показывают перелом, соответствующий переходу обезвоженного CSH в волластонит, диагностирован также у всех образцов, но у образца в возрасте 90 сут площадь эффекта наибольшая. Кроме того, у цементного камня с ЗМС при твердении в возрасте 90 сут отмечено формирование гидрогранатов, которые являются продуктами замещения у гидроллюминатов кальция части молекул воды на молекулы оксидов кремния (эффект при 220 °С) [3]. Соответственно, можно сделать вывод, что с увеличением сроков твердения происходит связывание $Ca(OH)_2$ в CSH, обусловленное присутствием в системе ЗМС, обладающих гидравлической активностью.

Микрофотографии, полученные РЭМ (рис. 3), позволили установить, что к возрасту 90 сут происходит частичное растворение стенки ЗМС, сопровождающееся формированием плотной контактной зоны; у некоторых частиц отмечено полное растворение стенки с формированием кристаллов гидрогранатов кубической и гексагональной формы [3].

Пуццоланическая активность ЗМС обусловливает повышенную плотность контактной зоны, что положительно сказывается на прочностных характеристиках материала. Наличие микрокремнезема в составе также приводит к связыванию $Ca(OH)_2$ в CSH, что в сочетании с ЗМС, обладающими по сравнению с МК достаточно низкой активностью, предположительно позволяет формировать новые центры кристаллизации новообразований на поверхности ЗМС, которые в этом случае играют роль подложки.

Снижение прочности бетона при дозировках ЗМС более 30 кг связано с относительно низкой прочностью ЗМС (21...35 МПа [1]). Нагрузки при разрушении образцов были как минимум в 1,7 раза выше прочности ЗМС, и при высоком содержании ЗМС в структуре происходило разру-

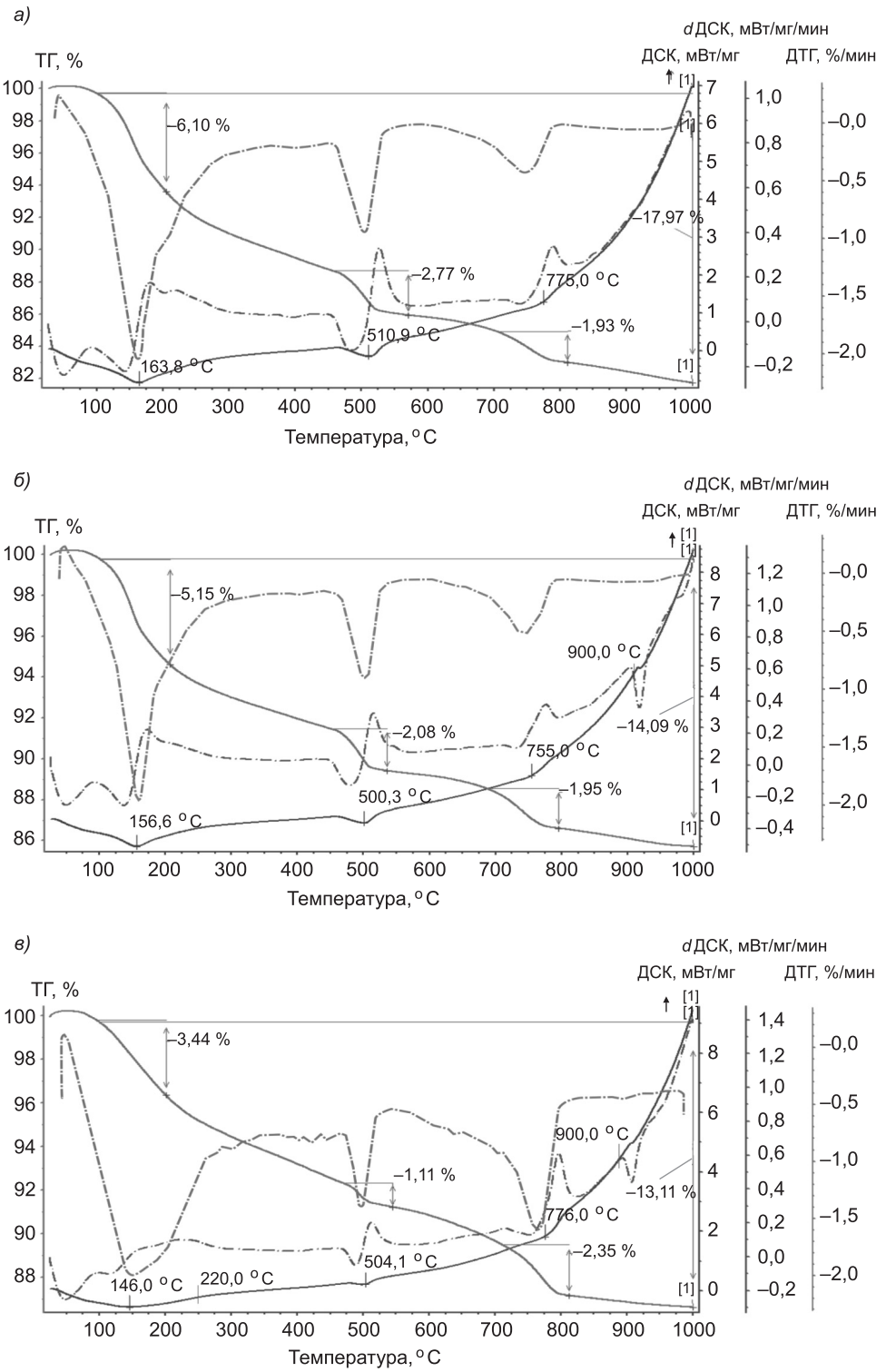



*Рис. 2*. Термограммы образцов цементного камня с добавкой ЗМС: *а* — в возрасте 1 сут, *б* — 7 сут, *в* — 90 сут

шение самих частиц. При испытаниях образцов отмечено, что при увеличении дозировки ЗМС сменялся характер разрушения образцов: на образцах с низкой дозировкой ЗМС отмечен хрупкий взрывной характер разрушения с разлетом осколков, при увеличении дозировки отмечено

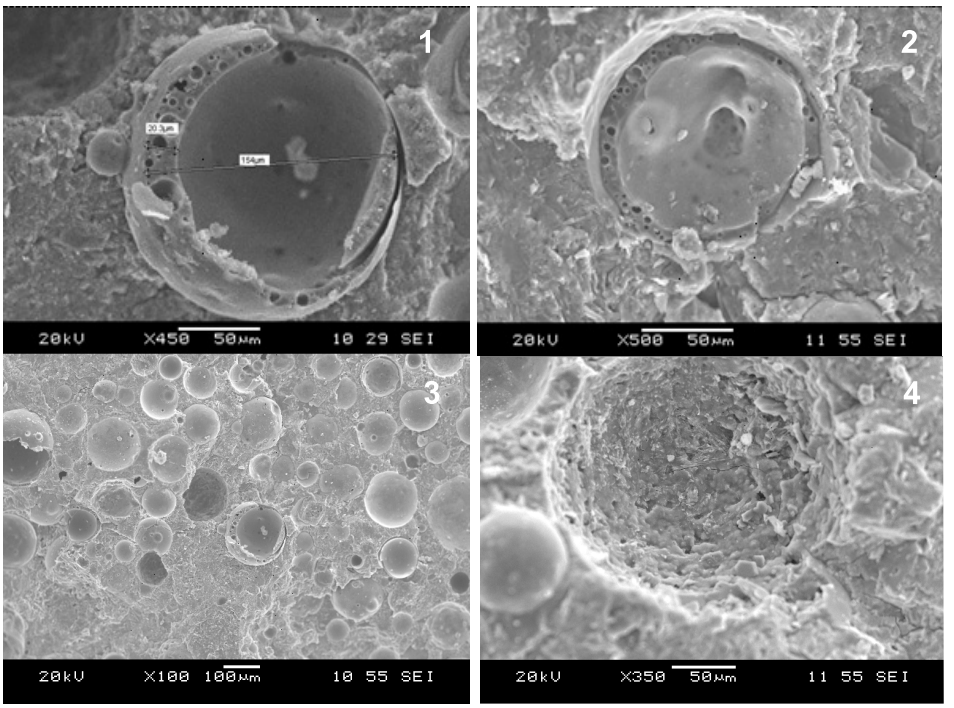



*Рис. 3.* Микрофотографии ЗМС в цементном камне: *1* — в возрасте 1 сут, *2* — в возрасте 90 сут, *3* — общий вид (в возрасте 1 сут), *4* — полностью растворившаяся частица ЗМС (возраст 90 сут)

более пластичное разрушение с образованием трещин и отслаиванием граней.

Установлено, что повышение дозировки ЗМС увеличивает удобоукладываемость бетонной смеси до 37,5 % (состав № 7 с дозировкой ЗМС 20 % от массы цемента). Очевидно, положительную роль играет структура ЗМС, представляющих собой мелкодисперсные сферические частицы с остеклованной поверхностью. Введение ЗМС в состав бетонной смеси приводит к снижению внутреннего трения и таким образом к снижению вязкости [4].

Введение в состав материала ЗМС позволяет увеличить водонепроницаемость и морозостойкость на 1 марку как для составов с В/Ц = 0,32, так и для составов В/Ц = 0,4. Проницаемость материала, как и его устойчивость к морозной деструкции, связана с его поровой структурой: определяющую роль играет количество и распределение макропор. Введение ЗМС, обладающих пуццоланической активностью, снижает макропористость благодаря созданию дополнительного объема новообразований и кольматации за счет этого части порового пространства.

**Выводы.** 1. Применение органоминеральной добавки МК–ЗМС–гиперпластификатор позволяет повышать прочностные характеристики тяжелого бетона, удобоукладываемость, морозостойкость и водонепроницаемость.

2. Положительное влияние ЗМС на указанные выше факторы позволяет снизить расход микрокремнезема и гиперпластификатора в органоминеральной добавке, что важно как с экономической точки зрения, так и с точки зрения утилизации отходов промышленности и расширения сырьевой базы производства строительных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fenelonov, V.B. The properties of cenospheres and the mechanism of their formation during high-temperature coal combustion at thermal power plants [Текст] / V.B. Fenelonov, M.S. Mel'gunov, V.N. Parmon // KONA Powder and Particle J. — 2010. — N 28. — P. 189–207.
2. Дворкин, Л.И. Цементные бетоны с минеральными наполнителями [Текст] / Л.И. Дворкин, В.И. Соломатов, В.Н. Воровой, С.М. Чудиновский. — Киев : Будивельник, 1991. — 136 с.
3. Рамачандран, В.С. Применение дифференциального термического анализа в химии цементов : пер. с англ. [Текст] / В.С. Рамачандран. — М. : Стройиздат, 1977. — 408 с.
4. Тейлор, Х. Химия цемента : пер. с англ. [Текст] / Х. Тейлор. — М. : Мир, 1996. — 560 с.

*САГРАДЯН Артур Аршакович, асп.;* E-mail: asagradyan72@mail.ru
*Тюменский государственный архитектурно-строительный университет*
*ЗИМАКОВА Галина Александровна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: ga.winter@yandex.ru*
*Тюменский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 05.03.12

**Sagradyan Artur Arshakovich**, post-graduate student; E-mail: asagradyan72@mail.ru, Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering, Russia
**Zimakova Galina Alexandrovna**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: ga.winter@yandex.ru, Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

## THE STUDY OF THE POZZOLANIC ACTIVITY OF HOLLOW GLASS MICROSPHERES

The study has been conducted in which the properties of concrete modified by organic-mineral additive comprising hollow glass cenospheres. It's established that hollow glass microspheres improve concrete's strength which is related with cenospheres' pozzolanic activitiy, studied by differential thermal analysis and scanning electron microscopy methods. Also positive effect of cenospheres on workability, frost resistance and watertightness of concrete has been established.

Key words: hollow glass microspheres, pozzolanic activity, concrete.

REFERENCES

1. Fenelonov, V.B. The properties of cenospheres and the mechanism of their formation during high-temperature coal combustion at thermal power plants [Text] / V.B. Fenelonov, M.S. Mel'gunov, V.N. Parmon // KONA Powder and Particle J. — 2010. — N 28. — P. 189–207.
2. Dvorkin, L.I. Cement Concrete With Mineral Additives [Text] / L.I. Dvorkin, V.I. Solomatov, V.N. Vorovoy, S.M. Chudinovski. — Kiev : Budivelnik, 1991. — 136 p. (in Russian)
3. Ramachandran, V.S. Applications of Differential Thermal Analysis in Cement Chemistry [Text] / V.S. Ramachandran. — M. : Stroyizdat, 1977. — 408 c.
4. Taylor, H. Chemistry of cement [Text] / H. Taylor. — M. : Mir, 1996. — 560 p. (in Russian)

# ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

УДК 624.132.33

Б.Б. ДАНИЛОВ, Б.Н. СМОЛЯНИЦКИЙ

## МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НЕКОТОРЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОДЗЕМНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

Рассмотрены особенности технологических процессов сооружения протяженных скважин и укрепления откосов котлованов при подземном строительстве и пути повышения безопасности работ. Определены значения параметров инструмента для формирования скважин в грунте методом «сухого» бурения горизонтальных скважин. Рассмотрены современные способы специальных строительных работ по укреплению грунтового массива армированием стержнями, усилению грунтовых оснований и устранению дефектов земляного полотна автомобильных и железных дорог инъектированием.

Ключевые слова: скважина, уплотнение, грунт, инъектирование, армирование грунта.

Бестраншейные способы прокладки подземных коммуникаций применяются в процессе строительства практически любых объектов в современных городах. Высокая плотность застройки городских территорий и переход подземного строительства на более глубокие горизонты приводят к тому, что бестраншейные способы часто становятся единственно возможными при производстве работ.

Один из основных процессов при бестраншейной прокладке подземных коммуникаций — сооружение скважин. При всем многообразии используемых для этого технологий их основой являются три способа сооружения скважин — прокол, продавливание и бурение. В последнее время развитие бестраншейных технологий в наибольшей мере связано с горизонтальным бурением. Широкое применение во всем мире находят буровые установки, в которых разрушение грунта и его удаление из скважины осуществляются посредством бурового раствора. При этом некоторые компоненты раствора оседают на стенках скважины, повышая их прочность и устойчивость к обрушению.

Основным достоинством такой технологии является высокая производительность. Кроме того, использование средств подземной локации позволяет существенно увеличить длину сооружаемых скважин. Однако существует и ряд недостатков, главный из которых — трудность обеспечения правильной геометрии сооружаемых скважин. Наиболее типичными дефектами являются недопустимое сужение или чрезмерное расширение скважины [1]. Такие нарушения геометрии создают в толще грунта полости, заполненные буровым раствором и размытым грунтом. При сооружении скважин под дорогами, зданиями, другими подобными объектами это недопустимо с точки зрения безопасности, так как полости в грунтовом массиве с большой вероятностью могут стать причиной после-

© Данилов Б.Б., Смоляницкий Б.Н., 2012

дующих обрушений и провалов дневной поверхности. Это может происходить как в процессе бурения, так и значительно позже после окончания строительства.

В ИГД СО РАН разработана технология «сухого» бурения без использования жидкости. Это позволяет избавиться от рассмотренных выше недостатков и повысить безопасность подземного строительства. Основой технологии является сооружение скважин методом частичного уплотнения грунта. Большая часть грунта разрушается и удаляется из скважины, а меньшая часть вдавливается в ее стенки. Это позволяет достигнуть необходимой устойчивости скважины за счет использования свойств самого грунта без применения буровых растворов или других дополнительных материалов.

Важной характеристикой процесса образования скважин комбинированным способом является соотношение объемов уплотняемой и извлекаемой частей грунта. От выбранного соотношения зависят устойчивость стенок скважины, энергоемкость процесса и ряд других параметров. Требуется определить минимальный объем грунта, который необходимо вдавить в стенки скважины, чтобы получить достаточную плотность.

Существует определенная граница степени уплотнения грунта, после которой нецелесообразно продолжать энергетическое воздействие, так как дальнейшее деформирование не сопровождается повышением плотности, а приводит лишь к увеличению зоны деформации, в которой теряются цементационные связи грунтовых частиц и происходит так называемое реотропное разупрочнение массива [2]. В совокупности с вытеснением влаги из уплотняемых слоев грунта это может увеличить риск осыпания стенок скважины.

Показатель уплотнения грунта на стенках скважины зависит главным образом от объема грунта, смещаемого в единицу площади боковой поверхности скважины [3]. Той же самой, по сути, характеристикой, связывающей уплотнение с геометрическими параметрами инструмента для формирования скважины комбинированным способом, является отношение площади поперечного сечения кольца к длине его наружной окружности $(S/L)$.

Характер взаимосвязи указанных конструктивных параметров кольцевого инструмента и величины уплотнения грунта был установлен на основе экспериментальных исследований процесса проходки скважин машинами ударного действия (пневмопробойниками), уплотняющими грунт в процессе движения в нем. Получена зависимость относительной плотности грунта непосредственно на стенках скважины при различных значениях отношения $S/L$ для двух типов грунтов, отличающихся исходной плотностью (рис. 1). За единицу относительной плотности принята исходная плотность грунта.

В соответствии с представлениями механики грунтов на участке значений $S/L$ от 18 до 24 происходит переход процесса деформации грунта в иное качество с заметным снижением интенсивности роста относительной плотности, сопровождающимся разрушением грунтовых слоев. Следовательно, приведенные значения отношения $S/L$ можно рекомендовать как область параметров, при которой обеспечивается уплотнение стенок, близкое по величине к аналогичному показателю для скважин, образованных пневмопробойниками.

Дополнительным достоинством рассмотренного комбинированного способа является возможность формирования практически калиброванных скважин правильной геометрической формы, что позволяет фактиче-

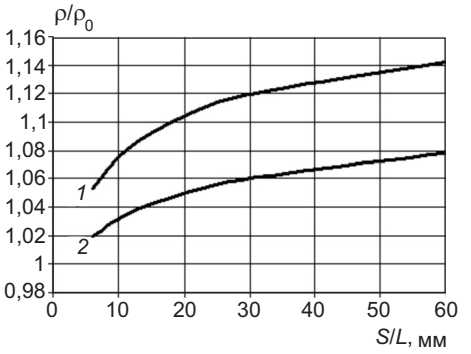



*Рис. 1.* Зависимость относительной плотности грунта от отношения уплотняемой к извлекаемой части грунта ($S/L$)

*1* — для плотных грунтов; *2* — для грунтов средней плотности

**Технические характеристики пневмоударных машин**

| Наименование параметра | Модель машины | | |
|---|---|---|---|
| | ПУМ-3 | ПУМ-35 | ПУМ-65 |
| Диаметр забиваемых стержней, мм | 12...25 | 20...30 | 35...65 |
| Энергия удара, Дж, не менее | 40 | 100 | 180 |
| Частота ударов, Гц, не менее | 10 | 10 | 9 |
| Расход воздуха, $м^3/мин$ | 1,5 | 2,5 | 4,5 |
| Давление сжатого воздуха, МПа | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| Длина, м | 0,7 | 0,8 | 0,8 |
| Масса, кг | 18 | 30 | 60 |

ски устранить риск последующего возникновения просадок и провалов дневной поверхности.

Другая важная задача при строительстве в стесненных условиях современных городов, особенно при так называемой «точечной застройке» рядом с уже существующими зданиями и сооружениями, — усиление и стабилизация свойств грунтовых оснований, обеспечение устойчивости стен глубоких котлованов, откосов оврагов или склонов поверхности земли. Переход к массовому строительству высотных зданий с развитой подземной частью вызвал потребность широкого внедрения новых методов усиления оснований, укрепления стен глубоких котлованов, уплотнения насыпных техногенных грунтов, закрепления и осушения крутых склонов и откосов и т.д.

Подобная проблема имеет место также в области дорожного строительства при возведении насыпей и эксплуатации автомобильных и железных дорог. Непрерывное воздействие подвижного состава, сезонные перепады температур, атмосферные и грунтовые воды способствуют возникновению и развитию в земляном полотне деформаций, оползневых дефектов насыпей и выемок, балластных корыт и лож, мешков, карманов и отдельных каверн. Это провоцирует возникновение различных аварийных ситуаций и приводит к большим экономическим потерям.

Для фиксации положения откосов котлованов, насыпей и выемок армированием в мировой практике широко применяют метод нагельного (стержневого) крепления [2]. Его суть заключается в том, что для обеспечения устойчивости крутых откосов или вертикальных стен котлована в грунт забивают, вдавливают или устанавливают на цементно-песчаном растворе в готовую скважину стержни (нагели). В результате образуется массивная подпорная (грунтово-арматурная) стена большой собственной массы. Укрепление армированием основано на развитии между стержнями и грунтом сил трения, сцепления.

Процесс «стержневого крепления» осуществляется слоями, начиная от поверхности грунта. Разработка котлована ведется ярусами (обычно высотой до 2 м). В пределах каждого яруса осуществляются укрепительные работы: установка защиты наружной поверхности от обвалов, эрозии, погружение в грунтовый массив арматурных стержней и связь их с защитной стенкой. Защита поверхности может быть осуществлена набрызг-бетонированием, покрытием из геотекстиля или других материалов. Далее производится разработка следующего нижележащего яруса

котлована и процесс повторяется. Сооруженный таким образом армированный грунтовый массив работает как единая подпорная стена.

Для укрепления откосов обычно используют рифленые арматурные стержни диаметром 12...28 мм периодического или винтового профиля. В зависимости от типа грунта и применяемого оборудования арматурные стержни могут быть погружены непосредственно забивкой, завинчиванием или вдавливанием, устанавливаться в предварительно пробуренные скважины диаметром 60...120 мм с закреплением цементно-песчаным раствором (буроинъекционные нагели).

По данным строительных ассоциаций США, при использовании армированного грунта затраты примерно в два раза ниже, чем в традиционных технологических процессах улучшения его свойств. Расход бетона снижается примерно в 3,3–3,5 раза, расход стали — в 5,9–9,6 раза [4].

Необходимость в производстве специальных строительных работ требует внедрения современных методов армирования и упрочнения грунтов. Существуют специализированные машины для выполнения таких работ (например, машины, выпускаемые фирмой Bauer Specialtiefbau, GMBH (ФРГ), другими известными мировыми производителями). Это, как правило, производительное, но тяжелое и громоздкое, достаточно дорогое самоходное оборудование, применение которого на откосах насыпей и выемок зачастую невозможно или ограничено.

Для выполнения этих работ в ИГД СО РАН созданы и прошли масштабную проверку в производственных условиях компактные переносные пневмоударные машины (рис. 2) со сквозным осевым каналом[1]. Основное технологическое назначение машин — забивание в грунт под

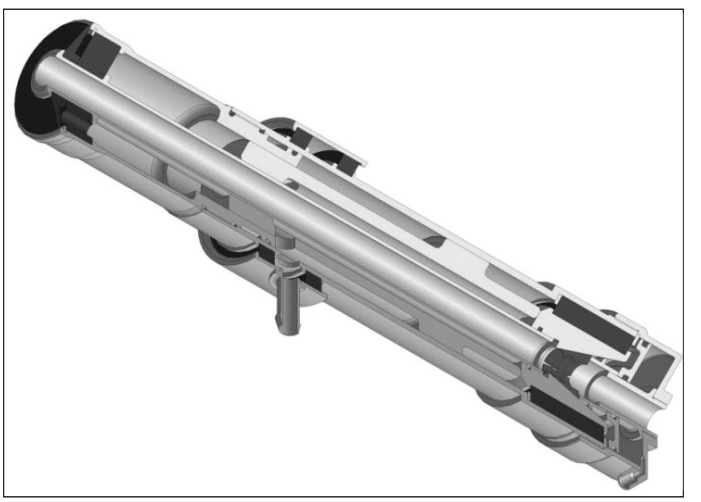


*Рис. 2*. Переносная пневмоударная машина со сквозным осевым каналом

любым углом наклона к горизонту и извлечение стержней диаметром от 12 до 65 мм, длиной от 2 до 10 м. При работе машин ударная нагрузка передается стержню в произвольном сечении через зажимной механизм, что исключает потерю стержнем устойчивости, позволяет работать в стесненных условиях и существенно расширяет технологические воз-

[1] Крицкий М.Я., Сырямин Ю.Н., Смоляницкий Б.Н., Скоркин Н.Ф. Комплекс мобильных машин и механизмов для упрочнения и армирования грунтов // Тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Опыт строительства и реконструкции зданий и сооружений на слабых грунтах». Архангельск, 2003.

можности машин, так как появляется возможность одновременно с забиванием вводить в образующуюся скважину необходимые конструктивные элементы. Такими могут быть, в частности, стержни буроинъекционного нагеля или специальные анкера.

Конструкция машин не имеет отечественных и зарубежных аналогов. Наличие оригинального зажимного механизма придает им уникальное свойство — в процессе забивания при приближении к поверхности грунта машины по команде оператора перемещаются по стержню без приложения внешних сил и зажимают его на требуемом удалении от поверхности для последующей передачи энергии удара. Технические характеристики пневмоударных машин со сквозным осевым каналом приведены в таблице. Технология производства некоторых работ иллюстрируется на рис. 3, 4.

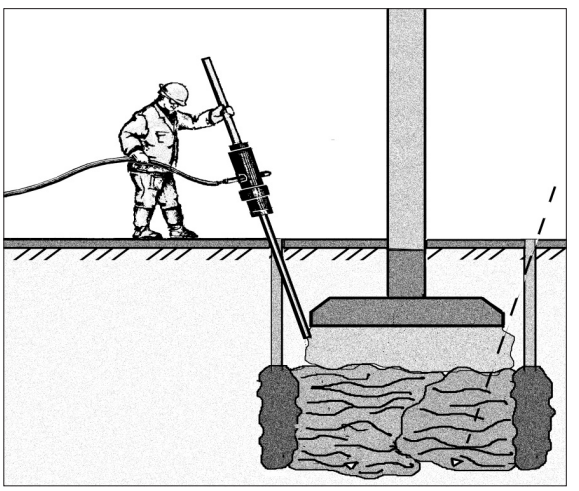


*Рис. 3.* Забивка инъектора пневмоударной машиной при укреплении основания опоры

Многолетний опыт эксплуатации выявил основные достоинства кольцевых пневмоударных машин:

— относительную простоту конструкции при высокой степени надежности;

— удобство в эксплуатации при проведении работ в стесненных условиях котлована, внутри или вблизи зданий и сооружений и т.д.;

— возможность расположения машины на сравнительно небольшом расстоянии от забоя, благодаря чему исключается потеря устойчивости стержневого элемента при погружении;

— совмещение различных технологических операций с погружением или извлечением стержневого элемента в виде трубы (подача в грунт через свободный торец различных материалов — инъектирующих и связующих жидкостей, растворов и т.п., установка внутрь необходимых конструктивных элементов).

Кольцевые пневмоударные машины прошли всестороннюю проверку в производстве. Например, они с успехом применялись в транспортном

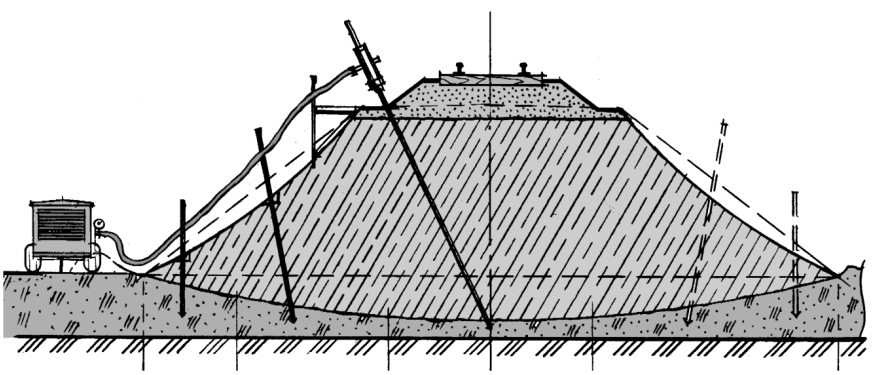


*Рис. 4.* Упрочнение слабого основания деформируемой насыпи с использованием пневмоударной машины

строительстве при возведении станций Новосибирского метрополитена «Речной вокзал» и «Проспект Маркса». С их помощью откосы котлованов станций вместо громоздких и металлоемких шпунтовых балок были закреплены стержнями. Длина откоса котлована, закрепленного на станции «Проспект Маркса», равнялась 600 м. Угол наклона откоса к горизонту составил 80 град. Глубина котлована достигала 21 м. От эрозии грунтовая поверхность откосов была защищена бетонными плитами размерами 1×1 м. Долговременное наблюдение за поведением грунтового массива показало, что в течение шести лет ведения строительных работ не происходило вывалов, сползаний грунта и других нарушений.

По оценкам специалистов ЗАО «Новосибирскметропроект», по сравнению с традиционными методами закрепления откосов стержневое закрепление грунта обеспечивает экономию средств до 45 % (за счет снижения трудозатрат, стоимости материалов и эксплуатации механизмов). При этом на 80–85 % увеличивается экономия металла, на 30–40 % сокращается время эксплуатации машин и механизмов. На каждом квадратном метре закрепляемой поверхности грунта трудозатраты сокращаются на 3,0–3,5 чел.-дня, экономия металла составляет 38,5 кг, экономия цемента — 0,7 куб. м.

**Выводы.** 1. Комбинированный метод сооружения скважин с частичным уплотнением грунта в стенки позволяет сооружать геометрически правильные скважины, обладающие достаточной устойчивостью для их последующей обсадки или размещения в них коммуникационных трубопроводов.

2. Пневмоударные машины со сквозным осевым каналом являются высокоэффективным техническим средством для выполнения специальных строительных работ по устройству стержневого крепления откосов земляных сооружений, усиления и стабилизации грунтовых оснований, устранению дефектов земляного полотна автомобильных и железных дорог.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рыбаков, А.П. Основы бестраншейных технологий [Текст] / А.П. Рыбаков. — М. : Пресс Бюро, 2005.
2. Цытович, Н.А. Механика грунтов [Текст] / Н.А. Цытович. — М. : Высш. шк., 1979. — 272 с.
3. Данилов, Б.Б. Определение относительной плотности стенок грунтовых скважин при сооружении их комбинированным способом [Текст] / Б.Б. Данилов, Б.Н. Смоляницкий // Изв. вузов. Строительство. — 2004. — № 1. — С. 49–53.
4. Каганов, Г.М. Армированный грунт в гидротехническом строительстве [Текст] / Г.М. Каганов, И.М. Евдокимова // Обзорная информация. Сер. Строит. конструкции и материалы. — Вып. 3. — М., 1996. — 61 с.

*ДАНИЛОВ Борис Борисович, д-р техн. наук, зав. лабораторией*
*Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск*
*СМОЛЯНИЦКИЙ Борис Николаевич, д-р техн. наук, проф.*
*Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск*

Получено 01.03.12

**Danilov Boris Borisovich**, doctor of technical sciences, head of laboratory, N.A. Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russia
**Smolyanitsky Boris Nikolaevich**, doctor of technical sciences, professor; N.A. Chinakal Institute of Mining SB RAS, Novosibirsk, Russia

## SAFETY-IMPROVING UNDERGROUND CONSTRUCTION METHODS

The authors weigh up the peculiarities of the processes for the long-distance hole making, the pit-slope stabilization and the ways to improve their safety in the underground construction. Specifications of the machine for «dry» drilling the horizontal holes in the soil are evaluated. The authors particularize the advanced special construction operations: the rod reinforcement of soil masses and ground foundations and the injection elimination of imperfections in auto- and railway ground beds.

Key words: borehole, consolidation, soil, injection, soil reinforcement.

REFERENCES

1. Rybakov, A.P. Fundamentals of Trenchless Technologies [Text] / A.P. Rybakov. — M. : Press Buro, 2005.
2. Tsytovich, N.A. Soil Mechanics [Text] / N.A. Tsytovich. — M. : Vysshaya Shkola, 1979. — 272 p.
3. Danilov, B.B. Evaluation of the specific density of weii walls made by the combined method in soil [Text] / B.B. Danilov, B.N. Smolyanitsky // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2004. — N 1. — P. 49–53.
4. Kaganov, G.M. Reinforced Ground in Hydraulic Engineering. [Text] / G.M. Kaganov, I.M. Evdokimova. Review. Ser. Construction Structures and Materials. — N 3. — M., 1996. — 61 p.

# САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.971.001.24

В.П. ШАЦКИЙ, В.А. ГУЛЕВСКИЙ

## ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В КОСВЕННО-РЕКУПЕРАТИВНЫХ ВОДОИСПАРИТЕЛЬНЫХ ОХЛАДИТЕЛЯХ

Рассматривается моделирование процессов тепло- и массообмена в рекуперативных пластинчатых противоточных водоиспарительных охладителях. Предлагается схема реализации этой модели, основанная на итерационном алгоритме решения системы конечно-разностных линейных уравнений, учитывающих продольную и поперечную теплопроводность теплообменных пластин.

Ключевые слова: противоточный водоиспарительный охладитель, пластина, моделирование, система уравнений, холодопроизводительность.

Нельзя не отметить существенные преимущества, которыми обладают водоиспарительные кондиционеры. Они просты по конструкции и в эксплуатации, экологически безвредны, обладают низкой потребляемой мощностью, саморегулируемы по эффективности охлаждения в зависимости от температурно-влажностных составляющих охлаждаемого воздуха. Выбор конструктивных характеристик таких охладителей, базирующийся на экспериментальных исследованиях, несмотря на многочисленные положительные результаты, не дает возможности проанализировать воздействие на интенсивность тепло- и массообмена всего комплекса конструктивных размеров и расходных характеристик водоиспарительных охладителей на полных диапазонах изменения интересующих параметров. Моделирование с помощью балансовых уравнений вообще представляется весьма условным, так как не позволяет проследить процессы тепло- и массопереноса в каналах охладителей, а также не дает возможности анализа геометрических параметров на эффективность охлаждения. Современным подходом является построение численного эксперимента на базе математического моделирования интересующих процессов.

Нами предложена математическая модель работы пластинчатых теплообменников, а также метод ее численной реализации [1]. В настоящей работе этот подход используется для моделирования работы косвенно-рекуперативных водоиспарительных охладителей.

Главным элементом водоиспарительного охладителя является испарительная насадка, в каналах которой в процессе тепло- и массообмена происходит охлаждение воздуха. Она представляет собой пакет капиллярно-пористых пластин, образующих каналы воздуховодного тракта. Поверхность пластин смачивается водой либо верхним орошением, либо снизу.

© Шацкий В.П., Гулевский В.А., 2012

Наиболее простые конструкции водоиспарительных кондиционеров базируются на принципе прямого охлаждения. Поток охлаждаемого воздуха направляется в каналы испарительной насадки, его температура снижается в результате испарения воды со смоченной поверхности пластин при непосредственном контакте. Энтальпия воздуха не изменяется, так как его охлаждение сопровождается насыщением парами испарившейся воды и процесс обработки воздуха происходит по адиабатному закону.

Очевидным недостатком воздухоохладителей прямого принципа действия является переувлажнение воздуха и, как следствие, ограниченность зон их эксплуатации. Другие охладители основываются на принципе косвенного охлаждения [2]. Они конструктивно более сложны и материалоемки, но дают сравнительно сухой охлажденный воздух и имеют стоимость в несколько раз ниже, чем фреоновые и воздушные холодильные машины.

Каналы испарительной насадки при косвенном охлаждении делятся на две качественно разные группы. К первой группе относятся «мокрые» каналы, по которым проходит вспомогательный поток воздуха температуры $t$, контактирующий с влажными поверхностями капиллярно-пористых пластин. Этот поток насыщается парами испарившейся воды и затем выбрасывается за границы охлаждаемого объема, имея температуру $t_{вых}$. Вторая группа — «сухие» каналы, по которым проходит основной поток воздуха температуры $T$. Эти каналы защищены от капиллярно-пористых пластин водонепроницаемой пленкой (на рис. 1 показана темной линией) и не контактируют с водой. Основной поток воздуха проходит по каналам, не меняя своего влагосодержания, и направляется в охлаждаемый объем, имея температуру $T_{вых}$.

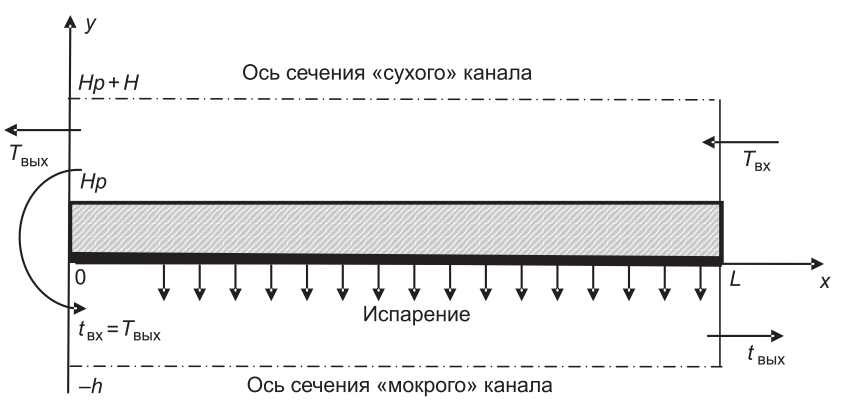



*Рис. 1.* Фрагмент испарительной насадки

Охлаждение основного потока воздуха происходит за счет испарения на поверхности пластин, образующих испарительную насадку. В отличие от прямого испарения в этом случае начинают играть важную роль не только капиллярные свойства материала пластин, но и их поперечное термосопротивление, зависящее от толщины пластины и теплопроводности материала.

Наиболее эффективной модификацией теплообменников косвенного охлаждения являются установки, работа которых основана на регенеративном принципе действия. Так, часть охлажденного основного потока воздуха на выходе из воздухоохладителя разворачивается и направляет-

ся во вспомогательные каналы испарительной насадки. Двигаясь во встречном направлении, этот поток впитывает в себя пары жидкости, а вследствие теплопередачи через пластины отбирает тепло от основного потока воздуха. Температура воздуха на входе во вспомогательный канал неизвестна и должна быть определена в процессе решения.

Отметим, что одной из основных характеристик эффективности работы охладителей воздуха является холодопроизводительность, характеризующая возможность нейтрализации теплопоступлений, равная

$$Q = C\rho G_s(T_{\text{вх}} - T_{\text{вых}}),$$

где $G_s$ — расход основного потока воздуха;
$\rho$, $C$ — соответственно плотность воздуха, кг/м$^3$, и удельная теплоемкость, Дж/(кг ×град.).

Приведем модель тепло- и массопереноса в каналах испарительной насадки регенеративных охладителей, в которой производится расчет всех параметров обрабатываемого воздуха как по длине, так и по сечению каналов. Она позволит оценить характер воздействия многих параметров (как задаваемых, так и изменяемых) на интенсивность процессов тепло- и массообмена. Вывод основных уравнений модели проводился благодаря выделению в движущейся бинарной смеси неподвижной элементарной площадки и записи уравнений баланса энергии в стационарном режиме. Приняты следующие предположения:

— используется смесь идеальных газов;

— поверхности пластин полупроницаемы;

— происходящие процессы тепло- и массопереноса однородны по высоте пластин, что следует из постоянства поля скорости по этой координате и устойчивости дифференциально тонкого слоя;

— проекция скорости на ось ординат считается равной нулю [3, 4].

Математическая модель процесса тепло- и массопереноса включает: уравнения энергии в каналах

$$-\rho V_T(x,y)C\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y}\right), \quad x \in (0,L), \quad y \in (Hp,\ Hp + H),$$

$$-\rho V_t(x,y)C\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda(t)\frac{\partial t}{\partial y}\right), \quad x \in (0,L), \quad y \in (-h,0);$$

уравнение переноса массы в «мокром» канале

$$V_t(x,y)\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y}\left(D(t)\frac{\partial W}{\partial y}\right), \quad x \in (0,L), \quad y \in (-h,0);$$

уравнение распределения температуры в пластине

$$\frac{\partial^2 Tp}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Tp}{\partial y^2} = 0, \quad x \in (0,L), \quad y \in (-HP,\ HP);$$

условия на входе

$$T\Big|_{x=L} = T_{\text{вх}}, \quad y \in (Hp,\ Hp + H),$$

$$t\Big|_{x=0} = T_{\text{вых}}, W\Big|_{x=0} = \varphi_{\text{вх}} W_{\text{нас}}(t_{\text{вх}}), \quad y \in (-h,0);$$

условия четности на осях симметрии каналов

$$\left.\frac{\partial T}{\partial y}\right|_{y=Hp+H} = 0, \quad x \in (0,L), \quad \left.\frac{\partial t}{\partial y}\right|_{y=-h} = 0, \quad x \in (0,L),$$

$$\left.\frac{\partial W}{\partial y}\right|_{y=-h} = 0, \quad x \in (0,L);$$

условия непроницаемости на торцах пластины

$$\left.\frac{\partial Tp}{\partial x}\right|_{x=0} = 0, \quad y \in (0,Hp), \quad \left.\frac{\partial Tp}{\partial x}\right|_{x=L} = 0, \quad y \in (0,Hp);$$

условия сопряжения

$$T\big|_{y=Hp} = Tp\big|_{y=Hp}, \quad x \in (0,L), \quad t\big|_{y=0} = Tp\big|_{y=0}, \quad x \in (0,L),$$

$$\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial y} = \lambda_{\text{пл}}(Tp)\frac{\partial Tp}{\partial y}, \quad y = Hp, \quad x \in (0,L),$$

$$\varepsilon R(t) D \frac{\partial W}{\partial y} = \lambda_{\text{пл}}(Tp)\frac{\partial Tp}{\partial y} - \lambda(t)\frac{\partial t}{\partial y}, \quad y = 0, \quad x \in (0,L).$$

Здесь $W$ — плотность пара, кг/м$^3$;
$\lambda_{\text{пл}}$, $D$ — соответственно теплопроводность пластины, Вт(м · град.) и коэффициент диффузии, м$^2$/с.

Коэффициент теплопроводности воздуха определялся по известной линейной зависимости

$$\lambda(t) = 0{,}023577 + 0{,}00007t.$$

Плотность насыщенного пара и коэффициент диффузии определялись по формулам

$$D(t) = 10^{-5}e^{0{,}00616t + 0{,}719}, \quad W_{\text{нас}} = 10^{-5}(3{,}5t^2 - 40{,}6t + 1090{,}5),$$

полученным с помощью аппроксимации табличных данных в рабочих диапазонах температур, под которыми мы понимаем температуры воздуха на входе и выходе из охладителя, обычно находящиеся в интервале 15...45 °С. $R(t) = (2500{,}6 - 2{,}372t) \cdot 10^3$ — удельная теплота парообразования, Дж/кг, $\varepsilon$ — множитель, характеризующий отличие испарения с поверхности пористой пластины от испарения со свободной поверхности. Он зависит от пористости, формы пор, глубины зоны испарения и т. д. Этот коэффициент может быть определен из балансового уравнения

$$\varepsilon R[\varphi_{\text{вых}} W_{\text{нас}}(t_{\text{вых}}) - \varphi_{\text{вх}} W_{\text{нас}}(t_{\text{вх}})] = C\rho(t_{\text{вх}} - t_{\text{вых}}) + kC\rho(T_{\text{вх}} - T_{\text{вых}}),$$

входные и выходные характеристики для которого определяются экспериментально, $k$ — отношение расходов основного потока к вспомогательному. Скорость в каналах определялась по формуле для ламинарного режима течения[1], учитывающей гидродинамический начальный участок:

[1] Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. — М. : Энергия, 1967. — 411 с.

$$V(x,y) = V_{\text{вх}}\left[1{,}5 - \frac{1{,}5y^2}{h^2} - 2\left(\sum_{n=1}^{\infty}\frac{\left(1 - \dfrac{\cos\left(\dfrac{g_n y}{h}\right)}{\cos(g_n)}\right)e^{\left(-4\frac{g_n^2 \nu x}{V_{\text{вх}} h^2}\right)}}{g_n^2}\right)\right],$$

где $g_n$ — положительные корни уравнения $\mathrm{tg}x = x$;
$\nu$ — кинематическая вязкость воздуха, м$^2$/с;
$h$ — половина сечения канала, м;
$V_{\text{вх}}$ — входная скорость потока воздуха, м/с.

Численное решение уравнений в каждом канале по отдельности невозможно, так как поверхность пластины, на которой необходимо ставить граничные условия, подвержена тепловому влиянию встречного потока, что исключает возможность пошагового движения в направлении потока воздуха в одном из каналов.

Нами был построен разностный аналог представленной выше модели на сетке с $Nx$ шагами по длине каналов, $Ny$ шагами по сечению каналов, $Ny/2 + 1$ шагами по сечению пластины. На первом шаге коэффициенты теплопроводности и диффузии вычисляются по приведенным выше формулам при среднеарифметическом входных температур. При $Nx = 30$ и $Ny = 10$ было получено 1218 конечно-разностных алгебраических линейных уравнений. После первого шага решения этой системы в каждой точке сетки корректировались коэффициенты теплопроводности и диффузии, и система решалась заново. Кроме того, коррекции подвергалось значение плотности пара на границе испарения, которое принималось равным плотности насыщенного пара. Данный итерационный процесс завершался, когда относительная погрешность по температурам на выходе из теплообменника в настоящей и предыдущей итерациях становилась менее 0,5 %.

Реализация математических моделей позволила провести численные эксперименты, отражающие воздействие различных факторов на эффективность работы охладителей. В качестве примера на рис. 2 и 3 представ-

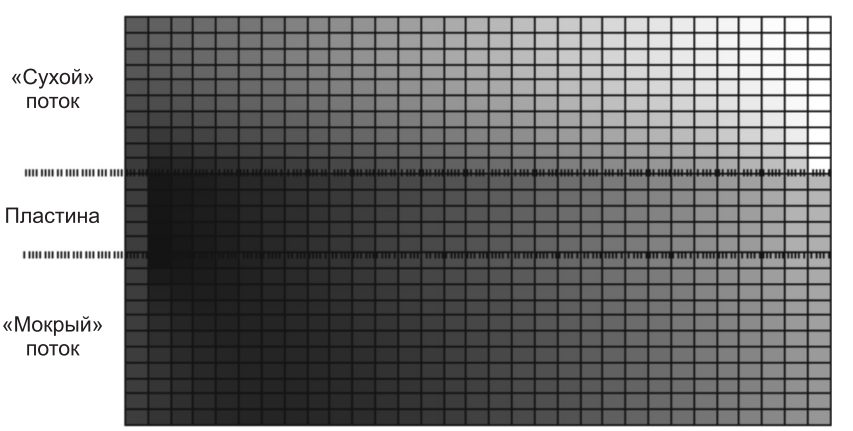



*Рис. 2.* Поле температур

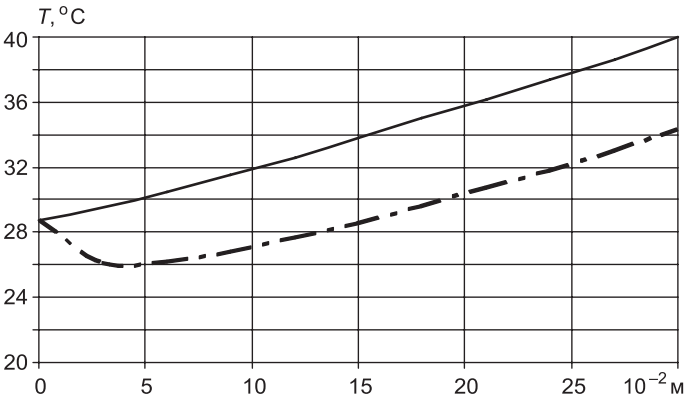



*Рис. 3.* График температур
основной поток, вспомогательный поток

лены поле и графики среднерасходных температур в косвенно-регенеративном охладителе длиной 0,3 м, с сечениями каналов 2 мм, сечением пластины 2 мм, длиной пластины 0,3 м, температурой на входе 40 °С и относительной влажностью 40 %. Скорость общего потока принималась равной 5 м/с, $k = 3$. Более светлым тонам соответствует более высокая температура, сплошной линией на графиках показана температура «сухого» воздуха, штриховой — «мокрого».

Одним из наиболее важных результатов расчетов было определение коэффициента отношения $k$ расхода основного потока к вспомогательному для получения максимальной холодопроизводительности и определения режимов работы водоиспарительных охладителей, влияющих на показатели эффективности. Учитывая, что общий расход воздуха складывается из основного $G_s$ и вспомогательного $G_m$ расходов потоков воздуха, получаем, что

$$G_s = G\frac{k}{k+1},$$

а холодопроизводительность определяется как

$$Q = C\rho G\frac{k}{k+1}(T_{\text{вх}} - T_{\text{вых}}).$$

При постоянном общем расходе воздуха, принимая $C\rho G$ за единицу, обозначим через

$$Q_{\text{уд}} = \frac{k}{k+1}(T_{\text{вх}} - T_{\text{вых}})$$

удельную холодопроизводительность.

Как видно из рис. 4, холодопроизводительность имеет максимум, который достигается приблизительно при соотношении 3:1 основного потока и вспомогательного.

**Заключение.** При изучении косвенно-испарительного охлаждения моделирование физических процессов с привлечением коэффициентов теплопередачи встречает ряд трудностей, так как в их выражения входят коэффициенты теплоотдачи, значение которых определить достаточно сложно. Расчеты показали, что они зависят не только от сечения каналов, но и от продольной координаты и скоростей потоков воздуха. В связи с этим моделирование необходимо проводить с помощью дифференци-

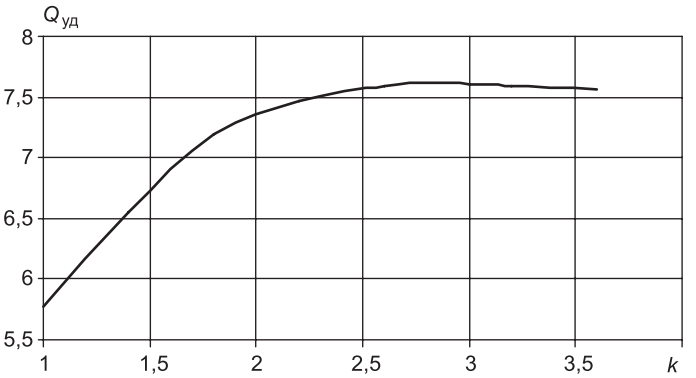



*Рис. 4*. Зависимость удельной холодопроизводительности от коэффициента перераспределения потоков

альных уравнений в частных производных эллиптического и параболического типов с соответствующими начальными и граничными условиями.

Чтобы избежать упрощений и допущений, в качестве метода реализации представленной модели используется решение системы конечно-разностных уравнений.

Представленная модель и метод ее реализации позволяют определять температуру потоков воздуха по длине охладителей, что дает возможность выбора их геометрических параметров.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шацкий, В.П. О некоторых аспектах моделирования работы пластинчатых теплообменников [Текст] / В.П. Шацкий, В.А. Гулевский // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 12. — С. 84–90.
2. Кокорин, О.Я. Установки кондиционирования воздуха [Текст] / О.Я. Кокорин. — М. : Машиностроение, 1978. — 264 с.
3. Шацкий, В.П. О выборе параметров двухступенчатого водоиспарительного охладителя воздуха [Текст] / В.П. Шацкий, Л.И. Федулова, А.Н. Шалиткина // Изв. вузов. Строительство. — 2001. — № 6. — С. 60–63.
4. Шацкий, В.П. О режимах работы охладителей водоиспарительного типа [Текст] / В.П. Шацкий, Л.И. Федулова, О.И. Грицких / / Изв. вузов. Строительство. — 2008. — № 11–12. — С. 39–43.

*ШАЦКИЙ Владимир Павлович, д-р техн. наук, проф.*
*Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I*
*ГУЛЕВСКИЙ Вячеслав Анатольевич, канд. техн. наук, доц.*
*Воронежский государственный аграрный университет им. императора Петра I*

Получено 23.03.12

**Shatsky Vladimir Pavlovich**, doctor of technical sciences, professor, Voronezh State Agricultural University Emperor Peter I, Russia
**Gulevsky Vyacheslav Anatolievich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Voronezh State Agricultural University Emperor Peter I, Russia

## FEATURES OF THE IMPLEMENTATION OF MATHEMATICAL MODELS OF HEAT AND MASS TRANSFER IN INDIRECT-RECUPEROTIVE WATER EVAPORATIVE COOLERS

We consider the simulation of heat and mass transfer processes in ricuperotive plate countercurrent water evaporative coolers. Offers scheme implementation of this model is

based on an iterative algorithm for solving systems of linear finite difference equations that take into account the longitudinal and transverse thermal conductivity of heat exchanger plates.

Key words: water evaporative coolers, plates, modeling, system of equations, cooling capacity.

## REFERENCES

1. Shatsky, V.P. About some aspects of modeling of operation of lamellar heat exchangers [Text] / V.P. Shatsky, V.A. Gulevsky // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 12. — P. 84–90.
2. Kokorin, O.Ya. Equipmets of air Conditioning [Text] / O.Ya. Kokorin. — M. : Mechanical Engineering, 1978. — 264 p.
3. Shatsky, V.P. About a choice of parameters of a two-level vodoisparitelny cooler of air [Text] / V.P. Shatsky, L.I. Fedulova, A.N. Shalitkina // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2001. — N 6. — P. 60–63.
4. Shatsky, V.P. About operating modes of coolers of vodoisparitelny type [Text] / V.P. Shatsky, L.I. Fedulova, O.I. Gritskikh // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2008. — N 11–12. — P. 39–43.

УДК 697.92 : 628.8

В.М. УЛЯШЕВА

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОМЕЩЕНИЯХ С ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ И ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

Проведены экспериментальные исследования распределения параметров микроклимата в помещениях с источниками тепловыделения. Приведены результаты численного моделирования тепло- и воздухообмена в вышеуказанных помещениях. Выполнен анализ результатов экспериментальных исследований и численного моделирования вентиляционных процессов.

Ключевые слова: источники тепловыделения, экспериментальные исследования, численное моделирование, тепловоздушные процессы.

Наличие обширного экспериментального материала, полученного в натурных условиях действующих компрессорных станций магистральных газопроводов [1, 2], позволило оценить адекватность принятого в исследованиях метода численного моделирования [3, 4].

Для сравнения экспериментального и численного методов приняты результаты натурных измерений параметров микроклимата для существующей схемы организации воздухообмена в двухтурбинном цехе Сосногорского ЛПУМГ с газотурбинными установками (ГТУ) мощностью 16 МВт. Измерения выполнены в теплый период года при температурах наружного воздуха $t_н$ = 19...22 °С и в холодный период соответственно при $t_н$ = −21...−23 °С.

Машинный зал служит для размещения ГТУ с газоходами, которые являются мощными источниками тепловыделения. В силу особенностей технологического процесса ГТУ размещена на отметке 2,400 м от пола, газоход также проложен выше уровня пола машинного зала на высоте порядка 2,000 м. Таким образом, в помещении имеют место две рабочие зоны — нижняя часть машинного зала и площадка обслуживания (рис. 1, *а*).

Как в любом помещении с источниками тепловыделения, воздушный режим машинного зала формируется под действием конвективных струй. Поэтому для анализа результатов экспериментального и численного методов исследований рассмотрена область конвективной струи *2* (рис. 1, *б*) в сечении $Z$ = 9,000 м. Подробно результаты натурных исследований приведены в работе [1].

С целью сравнения результатов численного моделирования и натурного эксперимента для всех выбранных сечений на поля температур и скоростей, полученных численными методами, выполнено наложение фактических значений параметров, определенных экспериментальным путем. Представлены наиболее характерные ситуации, при этом ось $X$ направлена параллельно оси ГТУ, ось $Z$ — перпендикулярно оси ГТУ (ось ординат) и ось $Y$ — соответствует оси аппликат.

© Уляшева В.М., 2012

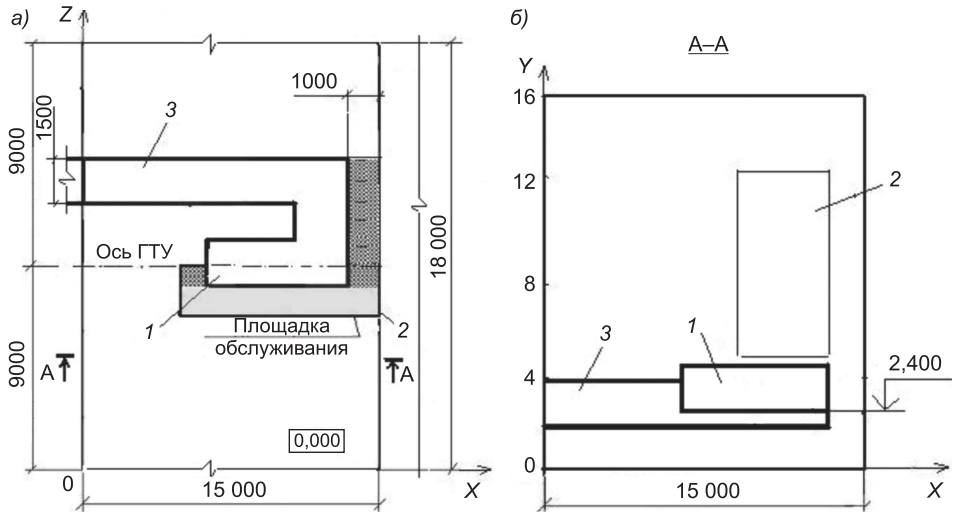



*Рис. 1.* План (*а*) модуля машинного зала и разрез А–А (*б*)
*1* — ГТУ; *2* — зоны проведения натурного эксперимента; *3* — газоход

Результаты численного моделирования представлены полями температуры и скорости движения воздуха (рис. 2, *а*; 3, *а*; 4, *а* и 5), данные экспериментальных исследований — в виде изолиний, наложенных на эти поля для вышеуказанных областей (рис. 2, *б*; 3, *б*; 4, *б* и 5).

На рис. 2, *а* показано поле температуры воздуха в сечении $Z$ = 9,000 м, проходящем через ось газотурбинной установки, в холодный период года, полученное в результате численного моделирования. Как было указано выше, область проведения эксперимента является частью конвективной струи, формирующейся над ГТУ. На рис. 2, *б* для выделенной области (см. рис. 1, *б*) на температурное поле, полученное с помощью численного метода, наложены экспериментальные изотермы.

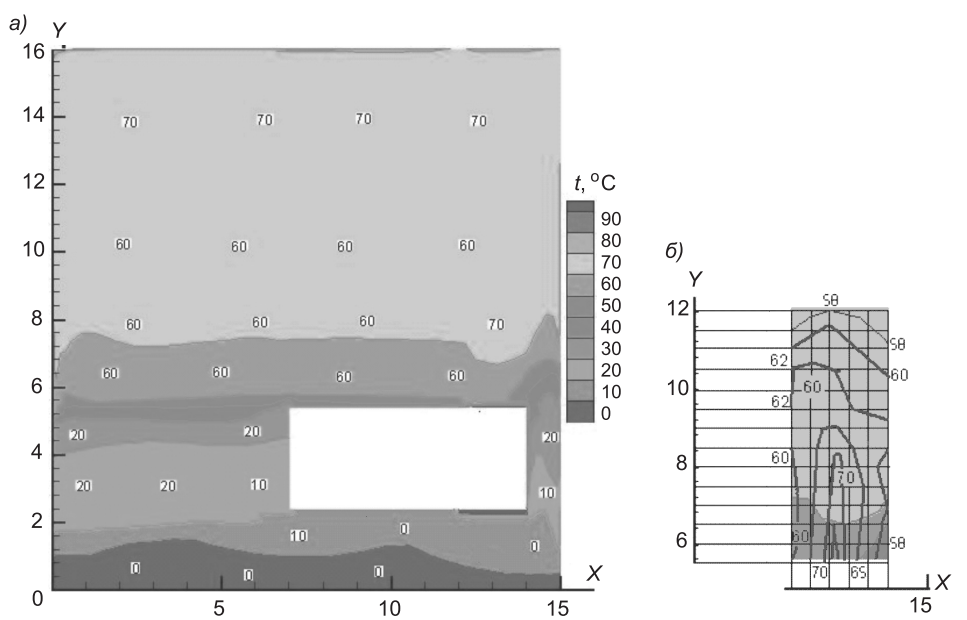



*Рис. 2.* Температурное поле при $t_н$ = −21...−23 °С в сечении $Z$ = 9,000 м по результатам численного моделирования (*а*) и совмещенные температурные поля (*б*)

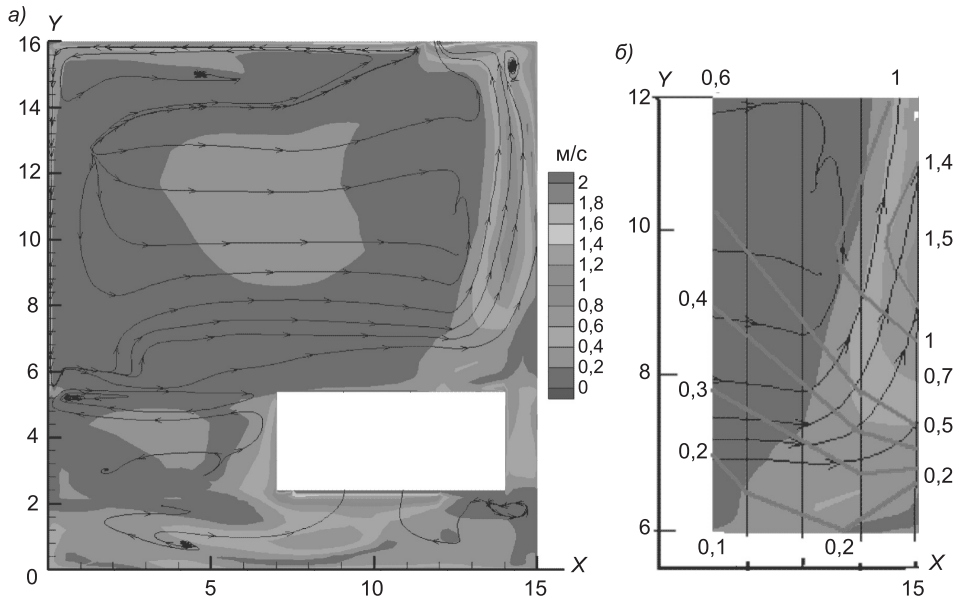



*Рис. 3.* Поле скорости движения воздуха (м/с) при $t_н = -21...-23$ °С в сечении $Z = 9{,}000$ м по результатам численного моделирования (*а*) и совмещенные поля (*б*) по результатам численного моделирования и натурного эксперимента

Результаты численного моделирования, как и в любом другом способе моделирования, характеризуются достаточно большой степенью усреднения. Так, например, температурные поля, полученные в результате численного моделирования (см. рис. 2, *а*), показывают наличие четкого, достаточно упорядоченного температурного расслоения по высоте помещения от 0 до 70 °С. Только в отдельных случаях, например вблизи твердых поверхностей оборудования, расположенных в пространстве выше уровня пола, можно выделить узкие зоны более интенсивного изменения температуры. Конфигурация основных температурных слоев и их положение в пространстве не позволяют однозначно выявить особенности формирования циркуляционного течения, так как внутри слоя с температурой 70 °С есть точки с температурой 60 °С. Аналогичная картина имеет место и в других температурных слоях. Однако результаты многочисленных исследований, в том числе и автора, показывают, что основным фактором, определяющим характер формирования параметров в рассматриваемых помещениях, является конвективный поток.

Сравнение вышеуказанных результатов с натурными измерениями, представленными на рис. 2, *б*, показывает, что распределение температуры в пространстве над источником тепловыделения (ГТУ), полученное при проведении экспериментальных исследований, имеет вид ярко выраженной конвективной струи.

Подтверждение наличия естественно-конвективного течения можно увидеть и на поле скорости движения воздуха (см. рис. 3), причем как по результатам численного моделирования, так и натурного эксперимента. В результате численного моделирования получены поля скорости с указанием направления движения воздуха. В обоих случаях достаточно четко прослеживается односторонняя ограниченность конвективной струи при ее натекании на поверхность внутренней стены, а также наличие искривления оси струи.

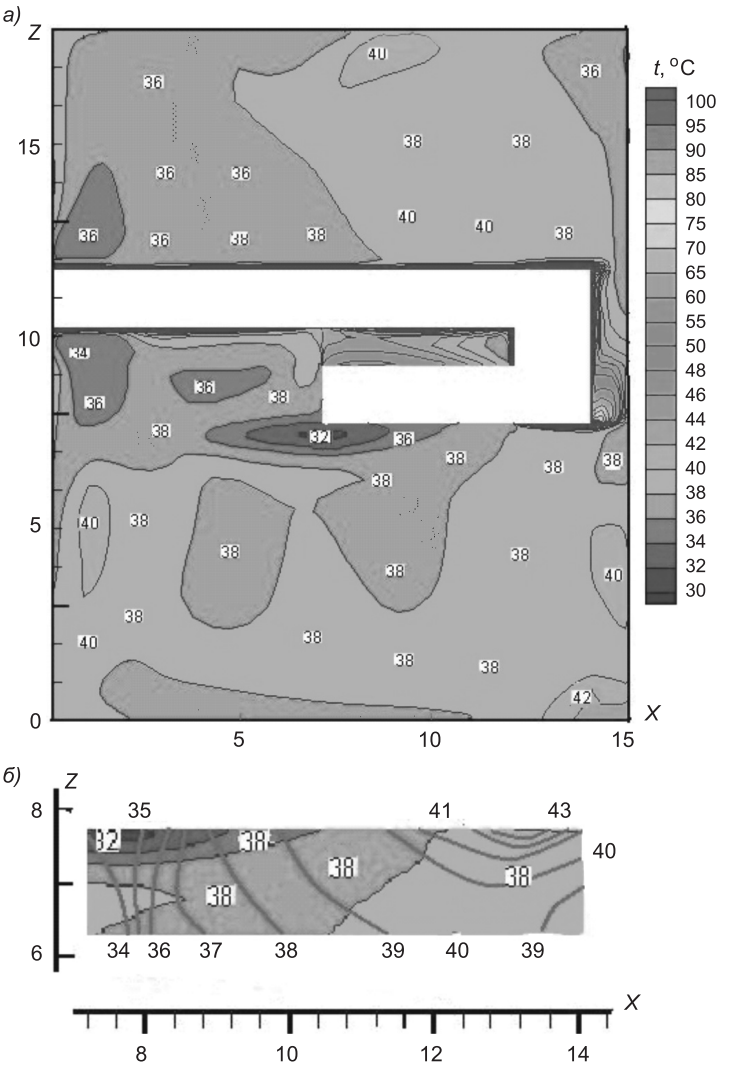



*Рис. 4*. Температурное поле при $t_н$ = 19...22 °С в сечении $Y$ = 4,400 м по результатам численного моделирования (*а*) и совмещенные температурные поля (*б*) по результатам численного моделирования и натурного эксперимента

В соответствующих точках выбранной области, согласно результатам исследований численным и экспериментальным методами, по скорости имеет место более высокий уровень сходимости, чем по температуре. При этом средние значения по выделенным температурным слоям при численном моделировании и в натурных условиях также находятся в удовлетворительном соответствии [1].

В сечении $Y$ = 4,400 м, соответствующем уровню рабочей зоны площадки обслуживания, выделена площадка обслуживания, в пределах которой выполнены измерения.

Что касается распределения температуры на уровне рабочей зоны площадки обслуживания (см. рис. 4), то в этом случае имеет место более четкое соответствие температурных полей, полученных численным и экспериментальным методами, чем при рассмотрении конвективной струи и рабочей зоны нижней части помещения. Это связано, в первую очередь, с

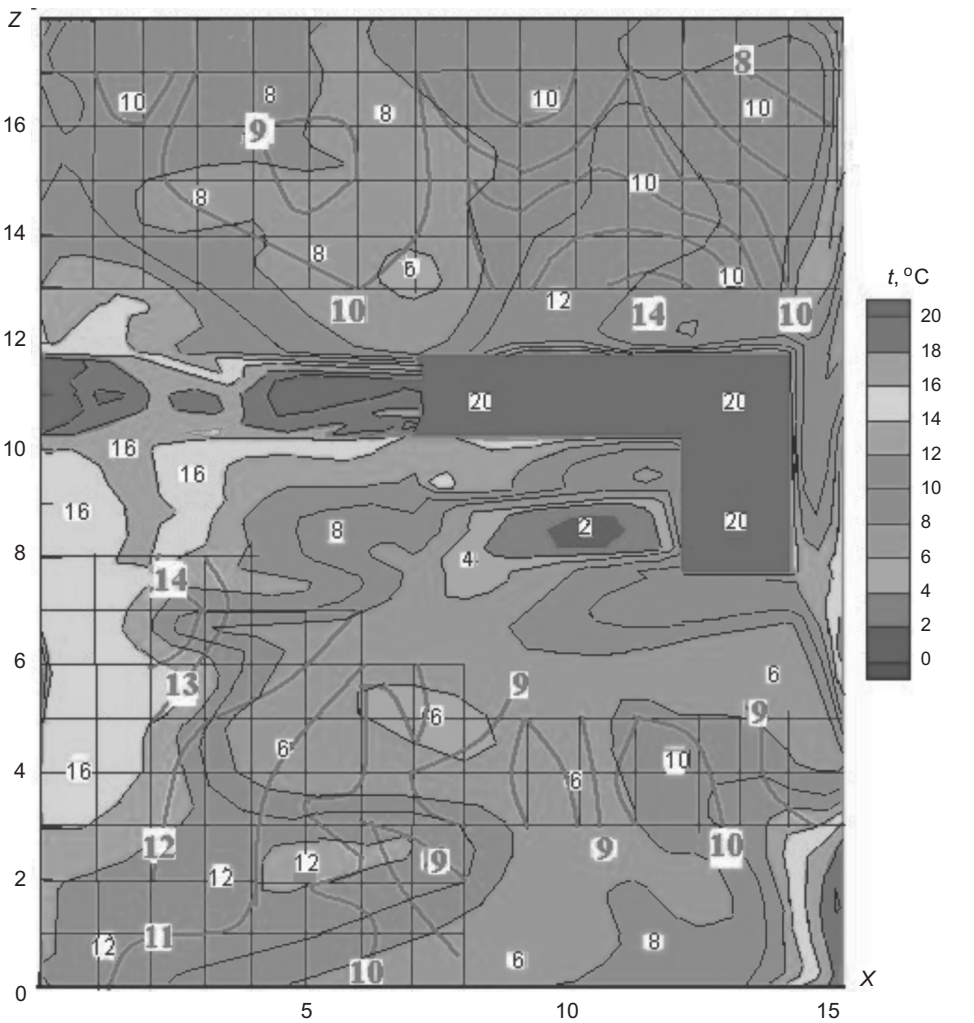



*Рис. 5.* Совмещенные температурные поля по результатам численного моделирования и натурного эксперимента при $t_н$ = −21...−23 °С в рабочей зоне нижней части машинного зала

незначительными размерами этой зоны. В рабочей зоне нижней части помещения (зоны проведения эксперимента показаны в виде сетки на рис. 5) также имеет место удовлетворительная сходимость результатов исследований, полученных численными и экспериментальными методами, в пределах областей возможного проведения натурного эксперимента.

**Выводы.** Использование результатов экспериментальных исследований тепло- и воздухообмена в машинных залах компрессорных станций подтвердило адекватность выбранного метода численного моделирования. Получена удовлетворительная сходимость температуры и скорости движения воздуха в соответствующих точках.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Уляшева, В.М. Совершенствование организации воздухообмена на объектах транспортировки газа [Текст] / В.М. Уляшева. — СПб. : СПбГАСУ, 2011. — 153 с.
2. Уляшева, В.М. К вопросу организации воздухообмена в помещениях с источниками тепловыделения [Текст] / В.М. Уляшева // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 8–9. — С. 38–45.

3. П о з и н, Г.М. К вопросу математического моделирования тепловоздушных процессов в помещениях с источниками теплоты [Текст] / Г.М. Позин, В.М. Уляшева // Изв. вузов. Строительство. — 2008. — № 9. — С. 52–57.
4. У л я ш е в а, В.М. Приближенное и численное моделирование тепловоздушных процессов в помещениях с источниками тепловыделения [Текст] / В.М. Уляшева // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 3. — С. 76–81.

*УЛЯШЕВА Вера Михайловна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: ulyashevavm@mail.ru*
*Ухтинский государственный технический университет*

Получено после доработки 16.02.12

**Ulyasheva Vera Mikhailovna**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: ulyashevavm@mail.ru, Ukhta State Technical University, Russia

## VENTILATION PROCESSES RESEARCH IN PUTTINGS WITH HEAT EMISSION SOURCES OF EXPERIMENTAL AND NUMERICAL METHODS

The experimental researches of a microclimate parameters distribution in puttings with heat emission sources are held. The numerical modeling heat and air exchange results in the above-stated puttings are reduced. The analysis of ventilation processes experimental research and numerical modeling results is executed.

K e y w o r d s: heat emission sources, experimental research, numerical modeling, heat and air processes.

REFERENCES

1. U l y a s h e v a, V.M. Perfecting Entitiess of an Air Exchange on Gas Haul Plants [Text] / V.M. Ulyasheva. — Saint-Petersburg : SPSUACE, 2011. — 153 p. (in Russian)
2. U l y a s h e v a, V.M. On the ussue of an air exchange in puttings with heats development sources [Text] / V.M. Ulyasheva // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 8–9. — P. 38–45. (in Russian)
3. P o z i n, G.M. On the issue of mathematical modeling of thermal — air Processes' with respect to heat source premises [Text] / G.M. Pozin, V.M. Ulyasheva // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2008. — N 9. — P. 52–57. (in Russian)
4. U l y a s h e v a, V.M. Approximated and numerical modeling thermal — air processes' in putting with heats development sources [Text] / V.M. Ulyasheva // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 3. — P. 76–81. (in Russian)

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 69.002.5.004.1

П.В. ПРИВАЛОВ

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СТАНЦИЙ (ПОСТОВ) ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ И ДОРОЖНЫХ МАШИН

Рассматриваются показатели эффективности функционирования ремонтно-обслуживающей базы как системы массового обслуживания, обеспечивающей нормативно-технические требования по поддержанию работоспособности парка строительных и дорожных машин.

Ключевые слова: парк машин, техническое обслуживание, ремонт, инженерно-техническая служба, структура, оборудование, рабочее место, ремонтно-обслуживающее предприятие, станция, пост технического обслуживания, система массового обслуживания, вероятность отказа машины.

Эксплуатационная надежность парка строительных и дорожных машин обеспечивается организацией ремонтно-обслуживающей базы как системы массового обслуживания. Важным элементом решения проблемы управления техническим состоянием машин является совершенствование технологических процессов и организация производства технического обслуживания (ТО) и ремонта, включая рационализацию структуры инженерно-технической службы, методов принятия инженерных решений, технологических приемов, оборудования постов и рабочих мест. Рассматриваются также методы проектирования, реконструкции и технологического перевооружения производственно-технической базы строительных предприятий и централизованных производств, станций технического обслуживания, обеспечивающие нормативные требования по поддержанию работоспособности парка машин. Для создания необходимых условий качественного выполнения технологических операций ТО и ремонта машин и повышения производительности труда обслуживающего персонала используются станции (посты) технического обслуживания.

Характерной особенностью работы технических средств обслуживания парка машин является изменяющийся во времени поток требований на их обслуживание, а также переменные — трудоемкость и продолжительность устранения неисправностей машин, т.е. система массового обслуживания (СМО). В области технической эксплуатации машинного парка примерами СМО являются: станции, посты, линии, участки ремонтных мастерских, склады запчастей и ремонтных материалов, топливо- и маслораздаточные колонки АЗС и др.

Система массового обслуживания состоит из следующих основных элементов: входящего потока объектов (требований), очереди, обслуживающих аппаратов (каналов) и выходного потока требований. Системы

© Привалов П.В., 2012

массового обслуживания классифицируются по ограничениям на длину очереди (с потерями и без потерь); количеству каналов обслуживания (одно- и многоканальные); типу обслуживающих аппаратов (универсальные и специализированные); порядку обслуживания (одно- и многофазовые, т.е. на одном посту, и линии ТО); числу обслуживающих аппаратов (ограниченные и неограниченные); приоритетности обслуживания (с приоритетом и без него); величине входящего потока требований (с ограниченным и неограниченным потоком); структуре СМО (замкнутые и открытые); взаимосвязи обслуживающих аппаратов (с взаимопомощью и без нее).

Наибольшее распространение находят замкнутые и открытые, одно- и многоканальные СМО, с однотипными или специализированными обслуживающими аппаратами, с одно- или многофазовым обслуживанием, без потерь или с ограничением на длину очереди и временем нахождения в ней.

**Показатели эффективности систем массового обслуживания с потерями ($W_0 = 0$)**

| Тип СМО | Относительная пропускная способность $g$ | Вероятность того, что все посты свободны $P_0$ | Вероятность отказа в обслуживании $P_{отк}$ | Число занятых обслуживающих аппаратов $n_{зан}$ |
|---|---|---|---|---|
| Одноканальная ($m = 1$) | $g = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$ | $P_0 = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$ | $P_{отк} = \frac{\omega}{\lambda + \mu}$ | $n_{зан} = \frac{\omega}{\lambda + \mu}$ |
| Многоканальная ($m = 1$) | $g = 1 - \frac{P^n}{n!} P_0$ | $P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{K=1}^{n} \frac{\rho^k}{K!}}$ | $P_{отк} = \frac{\rho^n}{n!} P_0$ | $n_{зан} = \rho g$ |
| С взаимопомощью многоканальная ($n > 1$, $\mu_{бр} = n\mu$) | $g = \frac{\mu_{бр}}{\lambda + \mu_{бр}}$ | $P_0 = \frac{\mu_{бр}}{\lambda + \mu_{бр}}$ | $P_{отк} = \frac{\omega}{\lambda + \mu_{бр}}$ | $n_{зан} = \frac{\omega}{\lambda + n\mu}$ |

Примечание. $\mu_{бр}$ — интенсивность технических воздействий канала обслуживания.

Показателями эффективности функционирования системы массового обслуживания являются (см. таблицу):

1) интенсивность обслуживания $\mu = 1/T_в$, где $T_в$ — продолжительность обслуживания одного требования;

2) приведенная плотность потока требований на обслуживание объектов $\rho = \lambda/\mu$, где $\lambda$ — параметр потока требований (загрузка обслуживающих аппаратов);

3) абсолютная пропускная способность $A$ — количество требований в единицу времени: $A = \lambda g$, где $g$ — относительная пропускная способность;

4) относительная пропускная способность $g$ — доля обслуженных требований от общего их количества;

5) вероятность свободных постов обслуживания $P_0$, когда все объекты исправны;

6) вероятность отказа в обслуживании $P_{отк}$, если имеются потери в ограничении по длине очереди или времени нахождения в ней;

7) вероятность образования очереди П с числом ожидающих обслуживания требований $W_0$;

8) среднее время нахождения в очереди объектов $t_{ож} = W_0/\lambda$;

9) число требований, связанных с системой, $K = W_0 + n_{зан}$, где $n_{зан}$ — число занятых обслуживающих аппаратов (каналов);

10) время связи требования с СМО: с потерями $t_{\text{сист}} = gt_g$ и без потерь $t_{\text{сист}} = t_g + t_{\text{ож}}$;

11) издержки от функционирования системы

$$И = C_1 W_{01} + C_2 n_{\text{св}} + (C_1 + C_2)\rho \to \min,$$

где $C_1$ и $C_2$ — соответственно стоимость простоя машины в очереди и обслуживающего канала, руб./ч;

$W_0$ — средняя длина очереди (число машин);

$n_{\text{св}}$ — число простаивающих каналов обслуживания.

Зависимости для определения указанных параметров функционирования СМО определяются ее структурой. Для СМО с потерями ($W_0 = 0$) эти зависимости приведены в таблице, а для других типов систем — в рассмотренных ниже примерах.

Задача оптимизации — распределить число каналов обслуживания (постов, рабочих мест, исполнителей) по различным подсистемам, чтобы И = min.

При дискретном изменении параметров (числа каналов обслуживания $n$) используются методы исследования операций, теории массового обслуживания, линейного и динамического программирования, имитационного моделирования и метод Монте-Карло.

При эксплуатации машин поток заявок на обслуживание поступает к оператору машинного агрегата (рис. 1).

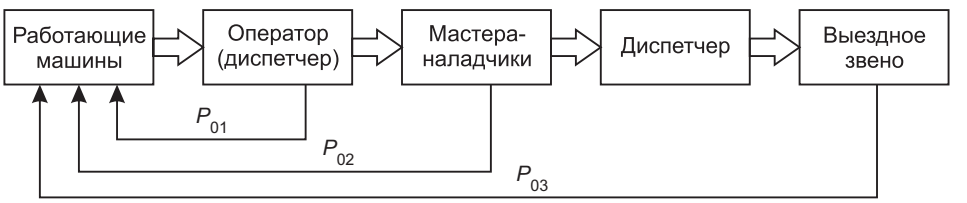



*Рис. 1.* Схема взаимодействия каналов обслуживания машин при устранении отказов и неисправностей

$P_{01}$ — вероятность устранения неисправности оператором (машинистом); $P_{02}$ — вероятность устранения неисправности мастером-наладчиком; $P_{03}$ — вероятность устранения неисправности ремонтно-обслуживающим предприятием

Во время остановки машины оператор выявляет неисправность и, если возможно, устраняет ее с вероятностью $P_{01}$. В случае невозможности оператор сообщает об этом мастеру-наладчику, т.е. выполняет функцию диспетчера. В свою очередь мастер-наладчик проводит диагностику машины, а затем устраняет неисправность с вероятностью $P_{02}$. В сложной ситуации он через диспетчера обращается за помощью в ремонтно-обслуживающее предприятие, которое устраняет отказ с вероятностью $P_{03}$.

В реальной обстановке в технологическом комплексе машин возникает несколько заявок. При этом возможна очередь на обслуживание. Здесь целесообразно в первую очередь обслуживание $i$-й заявки, простой из-за которой наносит производству наибольший ущерб.

Тогда суммарный поток $\Lambda$ требований на техническое обслуживание и ремонт машин всего комплекса равен:

$$\Lambda = \Lambda_{\text{ТО}} + \Lambda_{\text{р}} \text{ или } \Lambda = \sum_{i=1}^{n} \lambda_{\text{ТО}_i} m_i + \sum_{i=1}^{n} \lambda_{\text{р}i} m_i, \qquad (1)$$

где $\lambda_{\text{ТО}_i}$ — поток требований на ТО-1, ТО-2, ТО-3;

$\lambda_{\text{р}i}$ — поток требований на ремонт $i$-й машины;

$m_i$ — число машин $i$-й марки в парке;
$n$ — число марок машин в парке.

Для организации работы ремонтно-обслуживающего предприятия определяющим фактором является значение $P_{03}$. Система технического сервиса машин и оборудования, обслуживаемых данным ремонтно-обслуживающим предприятием, находится в различных возможных состояниях (рис. 2).

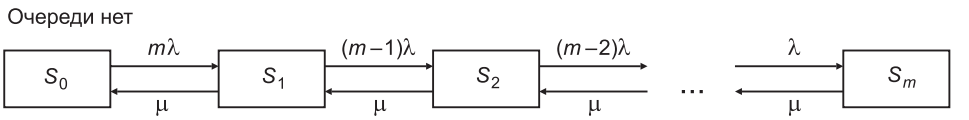



*Рис. 2.* Граф возможных состояний одноканальной системы массового обслуживания по устранению отказов

$S_0$ — все машины исправны и звено мастеров-наладчиков простаивает; $S_1$ — имеется один отказ и он устраняется; $S_2$ — имеются два отказа, из которых один устраняется, а другой ожидает своей очереди; $S_m$ — отказали все машины, из которых одна обслуживается, а остальные ожидают очереди

Суммарная плотность потока отказов $\lambda$ машинного агрегата будет складываться из плотности потока отказов машин ($\lambda_1$), канала обслуживания ($\lambda_2$) и т.д.

Продолжительность устранения отказов распределяется по показательному закону $F(t) = 1 - e^{-\mu t}$, где $\mu$ — интенсивность обслуживания, 1/ч, которая определяется из равенства $\mu = 1/T_в$, где $T_в$ — средняя продолжительность устранения одного отказа, ч.

При недостатке средств устранения отказов образуется очередь из вышедших из строя машин и оборудования, а избыток таких средств приводит к их простою.

Вероятность $P_K(t)$ поступления $K$ требований за время $t$:

$$P_K(t) = \frac{(\lambda t)^K}{K!} e^{-\lambda t}, \qquad (2)$$

где $\lambda$ — параметр потока требований (отказов).

Если число требований больше двух, то необходимо иметь два и более выездных звена. В этом случае критерий оптимизации с позиции ресурсосбережения будет соответствовать минимуму суммы потерь от простоев машин ($C_m$) и звена ($C_{зв}$) по устранению отказов.

Размещение пунктов ТО и ремонта машин и оборудования зависит от концентрации комплексов машин. Критерием выбора зоны обслуживания является требуемая загрузка производственных мощностей ремонтно-обслуживающего предприятия и минимизация передвижных технических средств обслуживания.

Разработанная математическая модель с использованием теории массового обслуживания позволяет оценить значение коэффициента технической готовности машин в зависимости от формы организации технического сервиса и обосновать размещение ремонтно-обслуживающих предприятий с учетом конкретных условий.

**Пример 1.** СТО имеет один пост ТО ($n = 1$) с ограничением длины очереди двумя машинами ($W_0 = m = 2$). Определить параметры эффективности работы поста при интенсивности потока требований на обслуживание в среднем $\lambda = 2$ треб./ч и продолжительности технического обслуживания: $T_в = 0{,}4$ ч.

Р е ш е н и е. При таком условии задачи:

— интенсивность обслуживания $\mu = 1/T_в = 1/0{,}4 = 2{,}5$ ч$^{-1}$;

— приведенная плотность потока $\rho = \lambda/\mu = 2/2{,}5 = 0{,}8$;

— вероятность свободного поста

$$P_0 = \frac{1-\rho}{1-\rho^{m+2}} = \frac{1-0{,}8}{1-0{,}8^{2+2}} = 0{,}34;$$

— вероятность образования очереди машин на ТО

$$\Pi = \rho^2 P_0 = 0{,}8^2 \cdot 0{,}34 = 0{,}217;$$

— вероятность отказа в обслуживании

$$P_{\text{отк}} = \frac{P^{m+1}(1-\rho)}{1-\rho^{m+2}} = \frac{0{,}8^{2+1}(1-0{,}8)}{1-0{,}8^{2+2}} = 0{,}173;$$

— относительная пропускная способность станции ТО

$$g = 1 - P_{\text{отк}} = 1 - 0{,}173 = 0{,}827;$$

— абсолютная пропускная способность СТО

$$A = \lambda g = 2 \cdot 0{,}827 = 1{,}654;$$

— среднее число занятых постов ТО

$$n_{\text{зан}} = \frac{\rho - \rho^{m+2}}{1-\rho^{m+2}} = \frac{0{,}8 - 0{,}8^{2+2}}{1-0{,}8^{2+2}} = 0{,}66;$$

— среднее число машин в очереди на ТО

$$W_0 = \frac{\rho^2[1-\rho^m(m+1-m\rho)]}{(1-\rho^{m+2})(1-\rho)} = \frac{0{,}8^2[1-0{,}8^2(2+1-2\cdot 0{,}8)]}{(1-0{,}8^{2+2})(1-0{,}8)} = 0{,}564;$$

— среднее время нахождения машины в очереди на ТО

$$t_{\text{ож}} = W_0/\lambda = 0{,}564/2 = 0{,}282;$$

— издержки на содержание системы (службы) ТО

$$\text{И} = C_1 W_{01} + C_2 n_{\text{св}} + (C_1 + C_2)\rho.$$

Если принять издержки от простоя каналов ТО (мастеров-наладчиков) равными $C_2 = 200$ руб./ч, а $C_1 = 50$ руб./ч, то

$$\text{И} = C_2 n_{\text{св}} + C_1 n_{\text{зан}} = 200 \cdot 0{,}34 + 50 \cdot 0{,}66 = 101 \text{ руб./ч},$$

$$n_{\text{св}} = P_0 = 0{,}34,\ n_{\text{зан}} = 0{,}66.$$

**Пример 2**. На СТО имеется один пост технического обслуживания ($n = 1$) и длина очереди не ограничена. Определить параметры эффективности работы поста ТО с приведенными исходными данными из примера 1.

Р е ш е н и е. Интенсивность ТО и приведенная плотность потока требований на техническое обслуживание будут те же: $\mu = 1/0{,}4 = 2{,}5$, $\rho = 2/2{,}5 = 0{,}8$ (загрузка поста);

— вероятность наличия свободного поста ТО

$$P_0 = 1 - \rho = 1 - 0{,}8 = 0{,}2;$$

— вероятность образования очереди на ТО

$$\Pi = \rho^2 P_0 = 0{,}8^2 \cdot 0{,}2 = 0{,}128;$$

— относительная пропускная способность СТО $g = 1$, так как все машины пройдут через пост ТО;

— абсолютная пропускная способность СТО $A = \lambda = 2$ треб./ч;

— среднее число занятых постов ТО $n_{\text{зан}} = \rho = 0{,}8$;

— среднее число машин в очереди на обслуживание

$$W_0 = \frac{\rho}{1-\rho} = \frac{0{,}8}{1-0{,}8} = 4;$$

— средняя продолжительность нахождения машины в очереди на ТО

$$t_{ож} = \frac{\rho}{\mu(1-\rho)} = \frac{0{,}8}{2{,}5(1-0{,}8)} = 1{,}6;$$

— издержки на содержание системы ТО

$$И = C_2 W_1 + C_1 n_{св} + (C_2 + C_1)\rho = 200 \cdot 4 +$$
$$+ 50 \cdot 0{,}2 + (200 + 50)\, 0{,}8 = 1010 \text{ руб./ч.}$$

**Пример 3**. На СТО два поста ТО ($n = 2$) — многоканальная система. Определить параметры работы системы технического обслуживания с остальными исходными данными в предыдущих примерах.

Р е ш е н и е. Интенсивность $\mu$ ТО и приведенная плотность $\rho$ потока требований на ТО будут те же: $\mu = 2{,}5$, $\rho = 0{,}8$;
— вероятность того, что оба поста ТО свободны

$$P_0 = \frac{1}{\sum\limits_{k=0}^{n} \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^{n+1}}{n!(n-\rho)}} = 0{,}294;$$

— вероятность образования очереди на ТО

$$П = \frac{\rho^n}{n!} P_0 = \frac{0{,}8^2}{1 \cdot 2} 0{,}294 = 0{,}094;$$

— относительная пропускная способность СТО $g = 1$, так как все машины пройдут через пост ТО;
— абсолютная пропускная способность СТО $A = \lambda = 2$ треб./ч;
— среднее число занятых постов ТО $n_{зан} = \rho = 0{,}8$;
— среднее число машин в очереди на обслуживание

$$W_0 = \frac{\rho П}{n-\rho} = \frac{0{,}8 \cdot 0{,}094}{2-0{,}8} = 0{,}063;$$

— средняя продолжительность нахождения машины в очереди на ТО

$$t_{ож} = \frac{П}{\mu(n-\rho)} = \frac{0{,}094}{2{,}5(2-0{,}8)} = 0{,}031;$$

— издержки на содержание службы ТО

$$И = C_2 W_{01} + C_1 n_{св} + (C_2 + C_1)\rho = 200 \cdot 0{,}063 + 50 \cdot 1{,}2 +$$
$$+ (200 + 50)0{,}8 = 272{,}6 \text{ руб./ч.}$$

**Выводы.** 1. Показатели эффективности функционирования системы массового обслуживания (технических средств ТО) машин в значительной степени зависят от ее структуры.

2. В системе массового обслуживания с ограничением по длине очереди только 82,7 % машин пройдут ТО, а 17,3 % машин покинут СТО необслуженными.

3. При переходе от одноканальной системы к многоканальной средняя длина очереди уменьшается более чем в 10 раз.

4. Издержки на содержание двухпостовой системы массового обслуживания в сравнении с однопостовой меньше в 1,3 раза, но при этом потребуются дополнительные капвложения в строительство и оборудование для оснащения одного поста ТО.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вентцель, Е.С. Теория вероятности и ее инженерные приложения : учеб. пособие для ВТУЗов. — 2-е. изд. [Текст] / Е.С. Вентцель, В.А. Овчаров. — М. : Высш. шк., 2000. — 306 с.
2. Овчаров, В.А. Прикладные задачи теории массового обслуживания [Текст] / В.А. Овчаров. — М. : Машиностроение, 1969. — 324 с.
3. Кокс, Д.Р. Теория очередей : пер. с англ. ; под ред. А.Д. Соловьева [Текст] / Д.Р. Кокс, В.А. Смит. — М. : Мир, 1966. — 264 с.

*ПРИВАЛОВ Петр Васильевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: Privalov.Petr.V@mail.ru*
*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено 29.03.12

**Privalov Pyotr Vasilyevich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: Privalov.Petr.V@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## ASSESSMENT OF EFFICIENCY OF FUNCTIONING OF STATIONS (POSTS) OF MAINTENANCE OF CONSTRUCTION AND ROAD CARS

Indicators of efficiency of functioning of re-montno-serving base as the system of mass service providing normative and technical requirements for maintenance of operability of park of construction and road cars are considered.

Key words: park of cars, maintenance, repair, engineering technical service, structure, equipment, workplace, repair serving shop, station, maintenance post, system of mass service, probability of failure of the car.

REFERENCES

1. Venttsel, E.S. Theory of Probability and its Engineering Appendices : studies a grant for technical colleges. 2nd prod. [Text] / E.S. Venttsel, V.A. Ovcharov. — M. : Higher School, 2000. — 306 p.
2. Ovcharov, V.A. Applied Tasks of the Theory of Mass Service [Text] / V.A. Ovcharov. — M. : Mechanical Engineering, 1969. — 324 p.
3. Koks, D.R. Theory Turns : Translation From English ; Ed. A.D. Solovyeva [Text] / D.R. Koks, V.A. Smith. — M. : World, 1966. — 264 p.

# НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 624.012

В.В. АДИЩЕВ, Д.С. ШМАКОВ

## ПРИМЕНЕНИЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ НЕЧЕТКИХ АППРОКСИМАЦИЙ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА

В настоящей работе предлагается новый метод построения нечетких аппроксимаций диаграмм деформирования материалов, в частности бетона. Нечеткие аппроксимации предполагается в дальнейшем применить к решению задачи о возникновении, стабилизации и росте трещин в нечеткой постановке.

Ключевые слова: неформализованные задачи, кластерный анализ, нечеткие величины, диаграммы деформирования, нечеткие аппроксимации.

Исследование неформализованных задач строительства [1] приводит к проблемам построения и анализа функциональных зависимостей по экспериментальным данным. При этом задача анализа зависимости включает в себя выявление и устранение противоречий в исходных данных, проверку гипотез о виде искомой зависимости, ее свойствах и оценку степени робастности найденной функции (пригодности эмпирической зависимости на практике).

Вероятностно-статистический подход — это основное направление, в рамках которого главным образом развиваются методы построения и анализа зависимостей по экспериментальным данным. Основные инструменты этого подхода: метод наименьших квадратов и статистические процедуры исследования и анализа оценок, полученных с его помощью. Но в условиях отсутствия полной и достоверной информации о функциях распределения проверка исходных гипотез по имеющейся совокупности экспериментальных данных затруднена. Все эти и многие другие обстоятельства привели к появлению нового направления (нестатистического), основанного на теории нечетких множеств и нечеткой логике. Данная работа выполнена в рамках этого направления.

В работах В.В. Адищева и В.М. Митасова [2, 3 и др.] предложен подход к расчету изгибаемых железобетонных элементов с использованием энергетических соотношений. Использованы нелинейные аппроксимации диаграмм деформирования бетона и арматуры. Задача о возникновении, стабилизации и росте трещин в изгибаемых железобетонных элементах поставлена физически адекватно. Сформулированная математическая модель позволяет определить глубину возникающей трещины, отражает основные особенности процесса возникновения и стабилизации трещины, но при этом все исходные данные считаются вполне определенными (детерминированными). В действительности разброс данных по характеристикам материалов очень велик.

© В.В. Адищев, Д.С. Шмаков, 2012

Суть предлагаемого метода обработки экспериментальных данных состоит в следующем: с помощью алгоритмов кластеризации определяются интерполяционные узлы аппроксимирующих функций как нечеткие величины, а затем строятся «функция-мажоранта» и «функция-миноранта».

Задача кластерного анализа состоит в разбиении множества объектов на группы (кластеры). При этом осуществляется формальное объединение объектов в группы на основе схожести признаков для объектов одной группы и отличий между объектами из разных групп. Как правило, координаты прототипов (образ центра кластера) заранее неизвестны, их находят одновременно с разбиением данных на кластеры. В метрическом пространстве «схожесть» обычно определяют метрикой пространства.

Большинство алгоритмов кластеризации не опирается на традиционные для статистических методов допущения — они могут использоваться в условиях почти полного отсутствия информации о законах распределения данных. Кластеризацию проводят для объектов с количественными (числовыми), качественными или смешанными признаками. В данной работе из широкого класса иерархических и плоских, четких и нечетких алгоритмов кластеризации [4] выбраны методы кластеризации для объектов с количественными признаками: обобщенный алгоритм нечетких средних и алгоритм горной кластеризации. Реализован наиболее эффективный и приемлемый в условиях практического использования и в рамках корректной постановки физических задач метод субтрактивной кластеризации. Существенным его достоинством является итерационное отыскание необходимого количества прототипов центров кластеров, обусловленное заданным ограничительным порогом. В нашем случае этот порог задается необходимым числом узлов интерполяции.

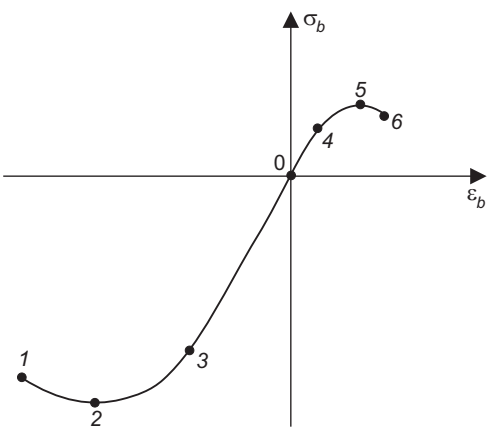


*Рис. 1.* Схематичная диаграмма деформирования бетона

Рассмотрим типичную диаграмму σ–ε деформирования бетона с наименьшим количеством узлов интерполяции (рис. 1).

Принцип построения аппроксимирующей зависимости сплайн-функциями следующий:

участок 1–2 $\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_2 + b_2(\varepsilon_2 - \varepsilon)^{m_2}$;

участок 2–3 $\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_3 + E_b(\varepsilon - \varepsilon_3) + b_3(\varepsilon_3 - \varepsilon)^{m_3}$;

участок 3–0 $\sigma_b(\varepsilon) = E_b(\varepsilon)$;

участок 0–4 $\sigma_b(\varepsilon) = E_{bt}(\varepsilon)$;

участок 4–5 $\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_4 + E_{bt}(\varepsilon - \varepsilon_4) + b_4(\varepsilon - \varepsilon_4)^{m_4}$;

участок 5–6 $\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_5 + b_5(\varepsilon - \varepsilon_5)^{m_5}$,

где $E_{bt}$, $E_b$ — начальные модули упругости бетона при сжатии и растяжении; $b_2$, $m_2$, $b_3$, $m_3$, $b_4$, $m_4$, $b_5$, $m_5$, — коэффициенты сплайнов;

$\varepsilon_i$, $\sigma_i$ — координаты $i$-го узла интерполяции.

Для участков 1–2, 5–6 можно принять $m_2 = 2$, $m_5 = 2$, в этом случае

$$b_2 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)^{m_2}}, \qquad b_5 = \frac{\sigma_6 - \sigma_5}{(\varepsilon_6 - \varepsilon_5)^{m_5}}.$$

Коэффициенты $b_3, m_3, b_4, m_4$ найдутся из условия сопряжения сплайн-функций и их производных в узлах интерполяции:

$$\sigma_{b-}(\varepsilon_2) = \sigma_{b+}(\varepsilon_2),\ \sigma'_{b-}(\varepsilon_2) = \sigma'_{b+}(\varepsilon_2),$$
$$\sigma_{b-}(\varepsilon_5) = \sigma_{b+}(\varepsilon_5),\ \sigma'_{b-}(\varepsilon_5) = \sigma'_{b+}(\varepsilon_5),$$

откуда

$$m_3 = \frac{E_b}{\sigma_2 - E_b\varepsilon_2}(\varepsilon_3 - \varepsilon_2) > 1,\ b_3 = \frac{\sigma_2 - E_b\varepsilon_2}{(\varepsilon_3 - \varepsilon_2)^{m_3}} > 0,$$

$$m_4 = \frac{E_{bt}}{E_{bt}\varepsilon_5 - \sigma_5}(\varepsilon_5 - \varepsilon_4) > 1,\ b_4 = \frac{\sigma_5 - E_{bt}\varepsilon_5}{(\varepsilon_5 - \varepsilon_4)^{m_4}} < 0.$$

Очевидные неравенства гарантируют вогнутость кривой диаграммы на участке 1–2–3 и выпуклость на участке 4–5–6. При этом узлы 2 и 5 являются точками экстремума.

Для аппроксимации диаграммы при растяжении в дальнейшем мы используем также упрощенную параболическую аппроксимацию с тремя узлами интерполяции (0,0), ($\varepsilon_5$, $\sigma_5$), ($\varepsilon_6$, $\sigma_6$)

$$\sigma(\varepsilon) = \psi(\varepsilon) = A\varepsilon^2 + B\varepsilon + C,$$

которая должна удовлетворять условиям

$$\psi(0) = 0,\ \psi(\varepsilon_5) = \sigma_5, \quad \psi(\varepsilon_6) = \sigma_6,$$

откуда следует

$$A = \frac{\sigma_5\varepsilon_6 - \sigma_6\varepsilon_5}{\varepsilon_5^2\varepsilon_6 - \varepsilon_6^2\varepsilon_5};\ B = \frac{\sigma_5 - A\varepsilon_5^2}{\varepsilon_5} = \frac{\sigma_5}{\varepsilon_5} - \frac{\sigma_5\varepsilon_6 - \sigma_6\varepsilon_5}{\varepsilon_5\varepsilon_6 - \varepsilon_6^2}, \quad C = 0.$$

Из условия $\psi'(\varepsilon_{rt}) = 0$ вытекает, что координаты ($\varepsilon_{rt}$, $R_{bt}$) точки максимума на диаграмме бетона в зоне растяжения определяются соотношениями

$$\varepsilon_{rt} = -\frac{B}{2A},\ R_{bt} = -\frac{B^2}{4A}.$$

Условный начальный модуль упругости для растяжения $E_{bt} = \psi'(0) = B$.

В качестве исходных данных используем результаты экспериментов по растяжению образцов-«восьмерок» и четырехточечному изгибу балок. В работе Е.М. Сергуничевой[1] приводятся такие данные при «жестком» нагружении, т.е. при контролируемой скорости деформирования. На рис. 2, *а* приведено «облако» экспериментальных данных, полученных при испытании «восьмерок» на растяжение, на рис. 2, *б* — результаты, полученные при испытании балки на изгиб.

Принят следующий алгоритм. Сначала для зоны растяжения определяем горным алгоритмом два прототипа центра кластеров (треугольни-

[1] Сергуничева Е.М., Ершова Н.В., Березина Э.В. Экспериментальное исследование прочностных характеристик железобетонных элементов при растяжении и изгибе // Тр. НГАСУ. Новосибирск, 2006. Т. 9, № 3 (37). – С. 10–15.

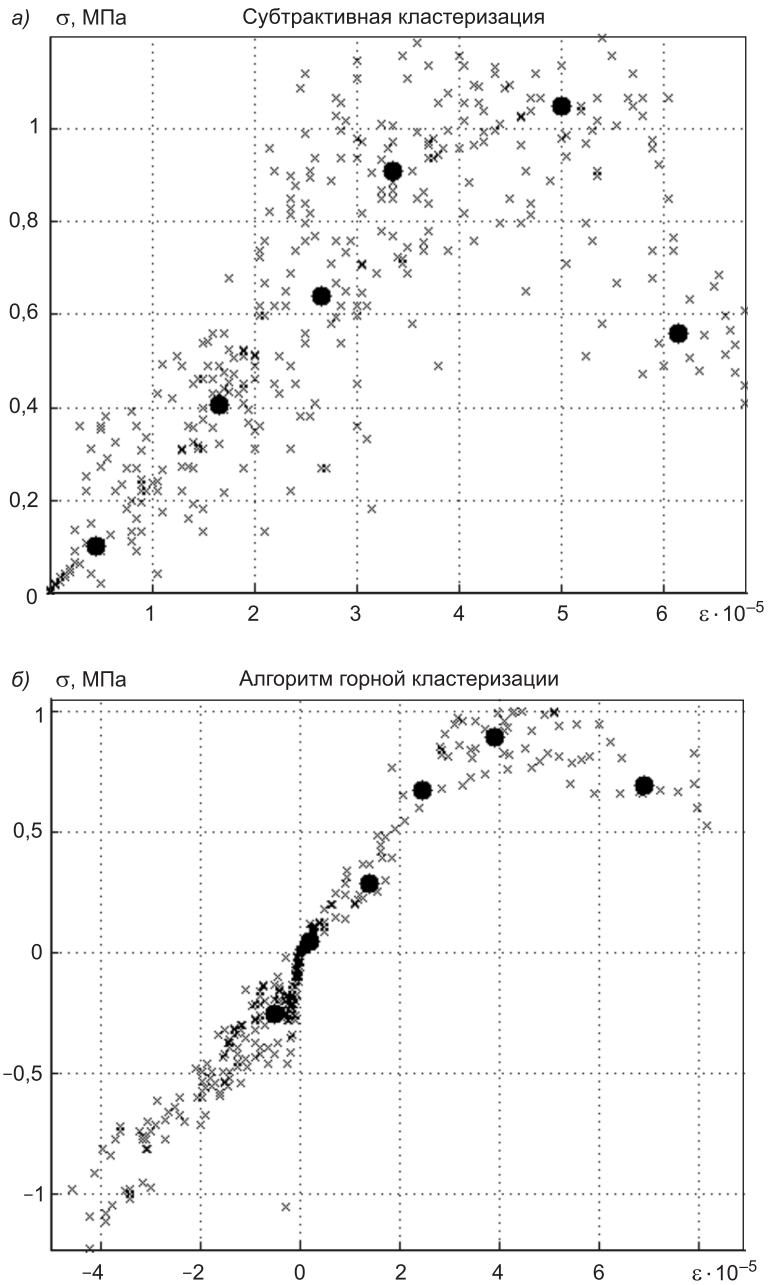
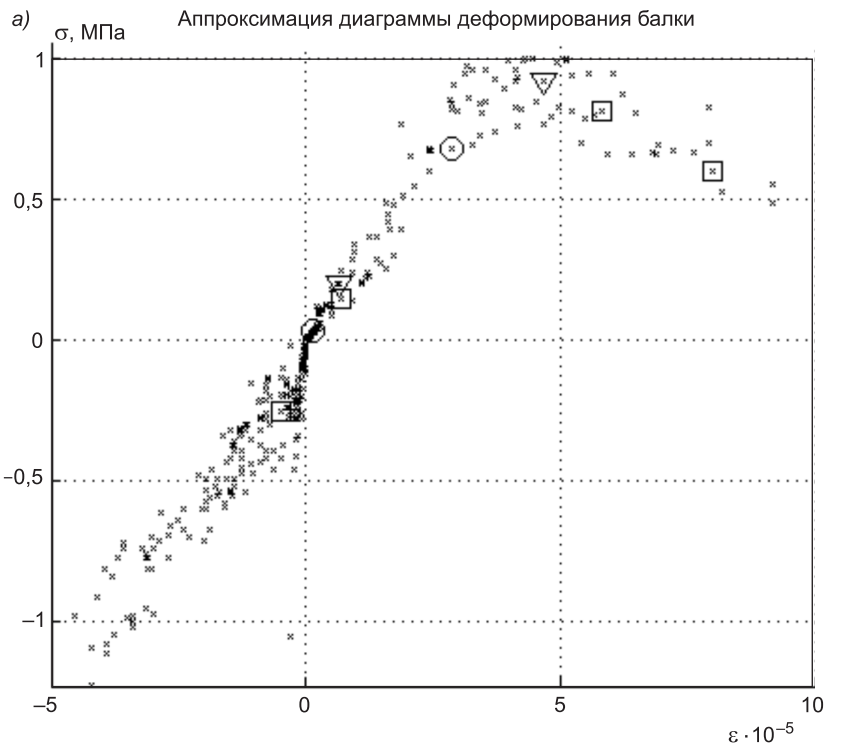
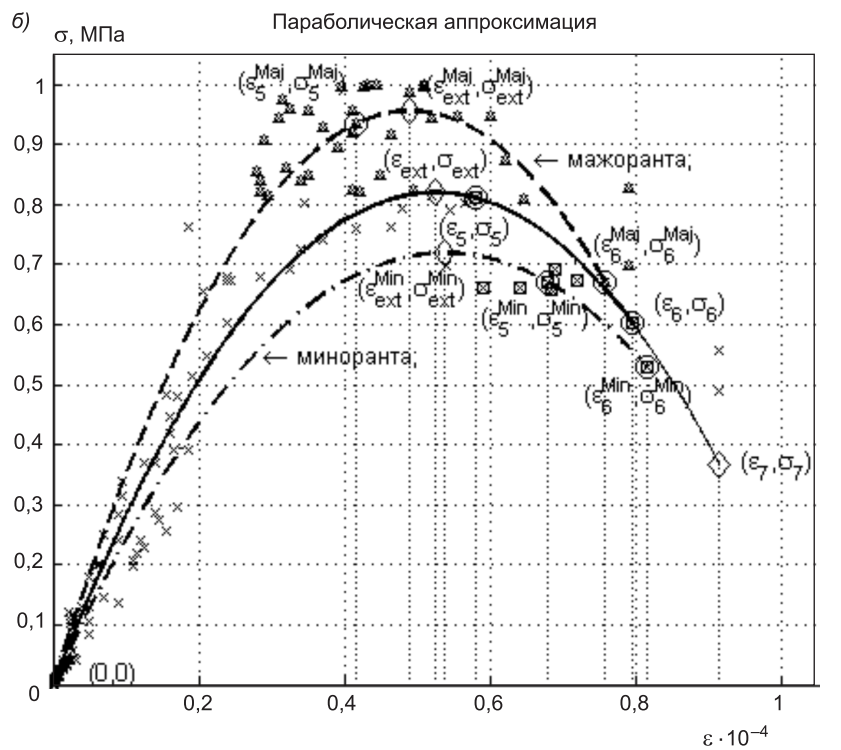



*Рис. 2.* Экспериментальные данные, полученные при испытании: *а* — образца-«восьмерки», обработанные методом субтрактивной кластеризации; *б* — балки на изгиб, обработанные с применением алгоритма горной кластеризации

ки), которые делят область на три части. В последней части находятся два основных узла (квадраты), а в каждой из первых двух областей находим по прототипу центра кластера (окружности). Затем в области между этими найденными центрами кластеров (окружностями) находим прототип центра кластера, являющийся интерполяционным узлом. После чего проводим отыскание первого узла в зоне сжатия. Объединяя совокупность всех узлов, получаем искомое множество точек, представленное квадратами на рис. 3,*а*.




Приведем описание этапов построения диаграммы-мажоранты и диаграммы-миноранты с визуальным выводом опорных точек (интерполяционных узлов) и представлением аппроксимирующих кривых (на каждом шаге производится поиск и отображение соответствующих прототипов центров кластеров):

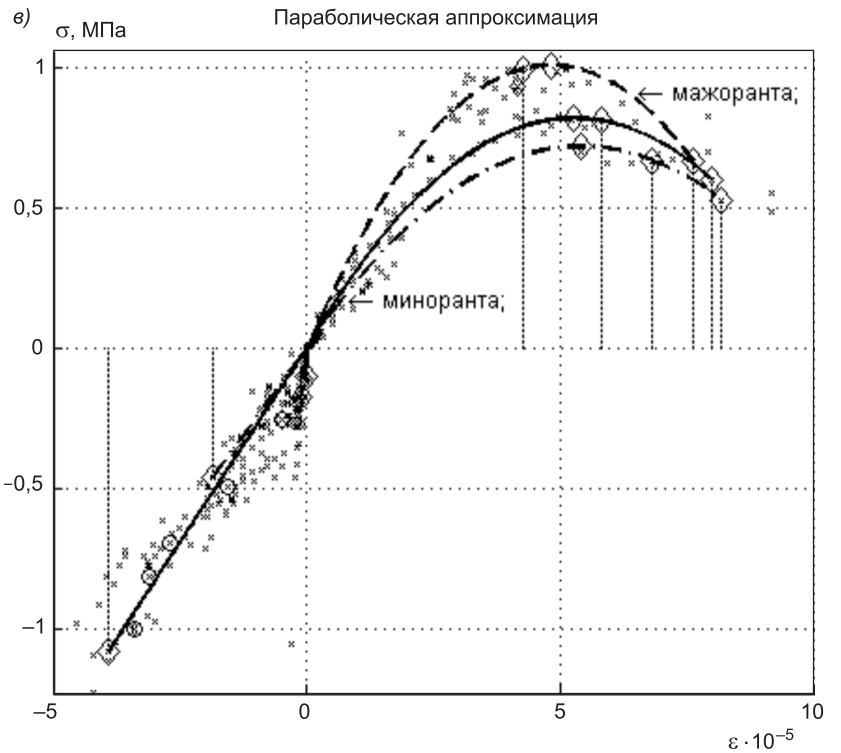



*Рис. 3.* Поиск узлов для интерполяции кусочными сплайнами (*а*); мажоранта, миноранта и осредненная аппроксимирующая функция в первом приближении (*б*); результат применения итерационного алгоритма (*в*)

- Определение интерполяционных узлов диаграммы в сжатой и растянутой зонах для аппроксимации сплайнами (случай 1) и параболической аппроксимации (случай 2). Используется модернизированный метод субтрактивной кластеризации.
- Уточнение местоположения концевых точек графика $(\varepsilon_6, \sigma_6)$ и $(\varepsilon_3, \sigma_3)$ для двух случаев аппроксимации. Применяется итерационный процесс с погрешностью $\delta = 0{,}05$.
- Визуализация усредненной кривой с помощью аппроксимации сплайнами и параболической аппроксимации.
- Определение интерполяционных узлов мажоранты и миноранты для 2-го случая. Применяется горный алгоритм кластеризации.
- Визуализация мажоранты, миноранты и осредненной диаграммы для 2-го случая.

В первом приближении точки мажоранты и миноранты отыскиваются по следующему сценарию.

о Точка $(\varepsilon_5^{Maj}, \sigma_5^{Maj})$ находится как прототип центра кластера, образованного из области всего множества точек $(\varepsilon_i, \sigma_i)$, $i = \overline{1,n}$:

$$\sigma_i \geq \sigma_5 \quad \text{и} \quad \sigma_i \geq \sigma(\varepsilon_i) = A\varepsilon_i^2 + B\varepsilon_i + C$$

(расположенного выше узла 5 и выше всей кривой-параболы).

о Точка $(\varepsilon_6^{Maj}, \sigma_6^{Maj})$ находится как прототип центра кластера, полученного ограничением всего множества точек $(\varepsilon_i, \sigma_i)$, $i = \overline{1,n}$ областью, удовлетворяющей следующим условиям:

$$\sigma_i \geq \sigma_6,\ \sigma_i \geq \sigma(\varepsilon_i) = A\varepsilon_i^2 + B\varepsilon_i + C,\ \varepsilon_i \geq \varepsilon_5,\ \sigma_i \leq \sigma_5$$

(область лежит выше узла 6, выше всей кривой-параболы, продолженной до крайнего узла 7, а также правее и ниже узла 5).

- Точка $(\varepsilon_5^{Min}, \sigma_5^{Min})$ — это прототип центра кластера, содержащего такие точки $(\varepsilon_i, \sigma_i)$, $i = \overline{1,n}$, что

$$\sigma_i \le \sigma_5,\ \varepsilon_i \ge \varepsilon_5,\ \varepsilon_i \le \varepsilon_6,\ \sigma_i \le \sigma(\varepsilon_i) = A\varepsilon_i^2 + B\varepsilon_i + C$$

(точки лежат ниже и правее узла 5, левее узла 6 и ниже всей кривой-параболы).

- Точка $(\varepsilon_6^{Min}, \sigma_6^{Min})$ находится как прототип центра кластера, полученного ограничением всего множества точек $(\varepsilon_i, \sigma_i)$, $i = \overline{1,n}$ областью, удовлетворяющей следующим условиям:

$$\sigma_i \le \sigma_6,\ \varepsilon_i \ge \varepsilon_6,\ \sigma_i \le \sigma(\varepsilon_i) = A\varepsilon_i^2 + B\varepsilon_i + C$$

(область расположена ниже и правее узла 6 и ниже всей кривой-параболы с ее продолжением до крайнего узла 7).

На рис. 3,*б* в первом приближении показаны мажоранта и миноранта, а также приведена осредненная аппроксимирующая функция.

Законченный результат применения итерационного алгоритма проиллюстрирован на рис. 3,*в*. Итерационный процесс начинается от первого приближения и заканчивается, как только достигнуто заданное предельное значение отклонения $\delta = 0{,}05$ в заданных направлениях. На каждом шаге в растянутой зоне последовательно пересчитываются соответствующие коэффициенты параболической аппроксимации мажоранты и миноранты для вновь найденного положения узлов интерполяции в заданном порядке. В сжатой зоне крайние узлы мажоранты и миноранты в первом приближении находятся для линейного продолжения осредненной аппроксимации диаграмм, т.е. «склейки» диаграмм растянутой и сжатой зон. По найденным узлам интерполяции строятся граничные кривые: мажоранта и миноранта, ограничивающие область, содержащую все бесконечное множество «возможных» диаграмм. Таким образом, определяется нечеткая аппроксимация диаграммы деформирования в виде некоторой области, которой принадлежат кривые, соответствующие «возможным» аппроксимациям диаграммы.

Для использования в практических расчетах представим возможные диаграммы в виде параболической аппроксимации с коэффициентами — нечеткими числами, отражающими степень неопределенности экспериментальных данных.

Нечетким числом [4] называется выпуклое нормальное нечеткое множество с кусочно-непрерывной функцией принадлежности, заданное на множестве действительных чисел. В настоящей работе для удобства описания используются наиболее простые функции принадлежности — треугольные. На рис. 4 приведена треугольная функция принадлежности для нечеткого числа $\tilde{A}$.

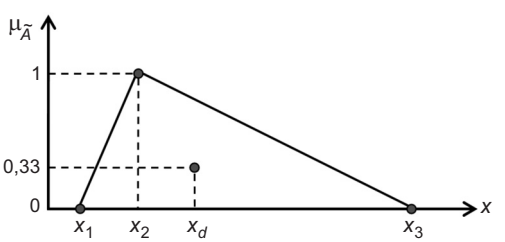



*Рис. 4.* Треугольная функция принадлежности и ее дефаззифицированное значение

Функция принадлежности $\mu_{\tilde{A}}(x)$ количественно определяет степень принадлежности элементов $x$ нечеткому множеству $\tilde{A}$.

Равенство нулю значений $\mu_{\tilde{A}}(x_1) = 0$, $\mu_{\tilde{A}}(x_3) = 0$ означает, что элементы $x_1$, $x_3$ не включены в нечеткое множество, $\mu_{\tilde{A}}(x_2) = 1$ соответствует полностью включенному элементу. Значения между 0 и 1 характеризуют элементы, включенные с некоторой степенью неопределенности.

Формально «треугольное» нечеткое число $\tilde{A} = \{(x_1;0), (x_2;1), (x_3;0)\}$ будем обозначать тройкой чисел $\tilde{A} = (x_1, x_2, x_3)$.

Параболическая аппроксимация диаграммы имеет вид

$$\sigma(\varepsilon) = \psi(\varepsilon) = A\varepsilon^2 + B\varepsilon,$$

где параметры $A$, $B$ определяются координатами интерполяционных узлов $(\varepsilon_5, \sigma_5), (\varepsilon_6, \sigma_6)$

$$A = \frac{\sigma_5\varepsilon_6 - \sigma_6\varepsilon_5}{\varepsilon_5^2\varepsilon_6 - \varepsilon_6^2\varepsilon_5}, \quad B = \frac{\sigma_5}{\varepsilon_5} - \frac{\sigma_5\varepsilon_6 - \sigma_6\varepsilon_5}{\varepsilon_5\varepsilon_6 - \varepsilon_6^2}.$$

В свою очередь координаты точки максимума на диаграмме вычисляются по формулам

$$\varepsilon_{rt} = -\frac{B}{2A}, \quad R_{bt} = -\frac{B^2}{4A}.$$

Алгоритм фаззификации заключается в процедуре составления треугольных функций принадлежности для каждой из нечетких величин $\tilde{A}$, $\tilde{B}$, $\tilde{R}_{bt}$, $\tilde{W}_{rt}$, $\tilde{\varepsilon}_{bt}$. В тройку $(x_1, x_2, x_3)$ последовательно подставляются рассчитанные значения по соответствующим аналитическим формулам для миноранты, осредненной кривой и мажоранты для каждой из представленных величин.

$$\tilde{R}_{bt} = (0{,}7197;\ 0{,}82;\ 1{,}0092),$$
$$\tilde{W}_{rt} = (4{,}3986\cdot10^{-5};\ 5{,}4797\cdot10^{-5};\ 5{,}721\cdot10^{-5}),$$
$$\tilde{\varepsilon}_{bt} = (7{,}58\cdot10^{-5};\ 7{,}95\cdot10^{-5};\ 8{,}15\cdot10^{-5}),$$
$$\tilde{E}_b = (2{,}4865\cdot10^4;\ 2{,}7692\cdot10^4;\ 2{,}7692\cdot10^4),$$
$$\tilde{A} = (-4{,}3833\cdot10^8;\ -2{,}9757\cdot10^8;\ -2{,}4814\cdot10^8),$$
$$\tilde{B} = (2{,}6726\cdot10^4;\ 3{,}1242\cdot10^4;\ 4{,}2064\cdot10^4).$$

Для получения детерминированных значений $A = \tilde{A}^d = (x_d;\ \mu_A(x_d)) = (x_d;\ 0{,}33)$ (рис. 4) описанных характеристик нечетких диаграмм производится дефаззификация нечетких величин методом центра тяжести. Получаем следующий результат:

$$R_{bt} = \tilde{R}_{bt}^d = (0{,}85;\ 0{,}33),$$
$$W_{rt} = \tilde{W}_{rt}^d = (5{,}2\cdot10^{-5};\ 0{,}33),$$
$$\varepsilon_{bt} = \tilde{\varepsilon}_{bt}^d = (7{,}893\cdot10^{-5};\ 0{,}33),$$
$$E_b = \tilde{E}_b^d = (2{,}675\cdot10^4;\ 0{,}33),$$
$$A = \tilde{A}^d = (-3{,}28\cdot10^8;\ 0{,}33),$$
$$B = \tilde{B}^d = (3{,}334\cdot10^4;\ 0{,}33).$$

Для обоснования достаточности использования в расчетах упрощенной параболической аппроксимации найдем величину относительной погрешности

$$\delta = \frac{W_{rt}^0 - W_{rt}^1}{W_{rt}^1},$$

где $W_{rt}^0$ — плотность энергии разрушения при сплайн-аппроксимации; $W_{rt}^1$ — плотность энергии разрушения при параболической аппроксимации.

Площади под показанными осредненными аппроксимациями диаграмм на рис. 5 составляют плотности энергии разрушения для соответствующих случаев аппроксимации.

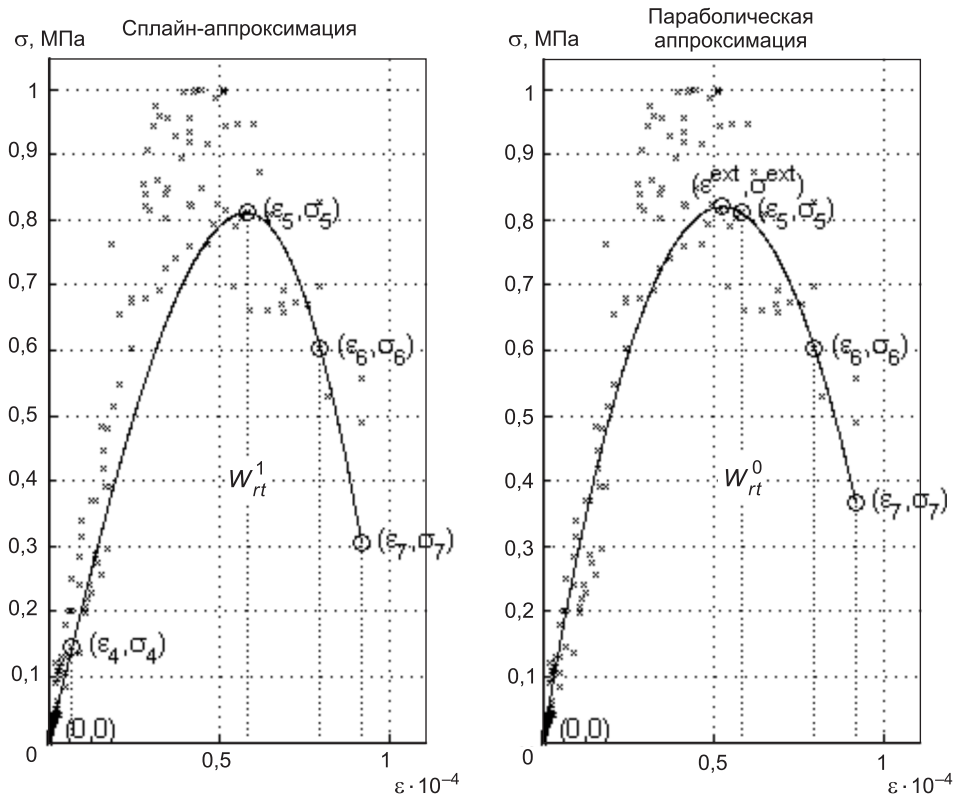



*Рис. 5.* Осредненные аппроксимации диаграмм

При расчете плотности энергии разрушения с использованием сплайн-аппроксимации координаты последнего узла $(\varepsilon_7, \sigma_7)$ определяются экстраполяцией, $\varepsilon_7$ приравнивается к максимальному из всех $\varepsilon_i$, $i = \overline{1,n}$, а $\sigma_7$ находится с помощью параболической экстраполяции:

$$\sigma_7 = \sigma_5 + (\varepsilon_7 - \varepsilon_5)^2 \frac{\sigma_6 - \sigma_5}{(\varepsilon_6 - \varepsilon_5)^2}.$$

Тогда выражения для удельных энергий принимают вид

$$W_{rt}^1 = \int_0^{\varepsilon_7} \overline{\psi}(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{A}{3}\varepsilon_7^{\,3} + \frac{B}{2}\varepsilon_7^{\,2},$$

$$W_{rt}^{0}=\int_{0}^{\varepsilon_4}E_{bt}\varepsilon d\varepsilon+\int_{\varepsilon_4}^{\varepsilon_5}[\sigma_4+E_{bt}(\varepsilon-\varepsilon_4)+b_4(\varepsilon-\varepsilon_4)^{m_4}]d\varepsilon+$$

$$+\int_{\varepsilon_5}^{\varepsilon_7}[\sigma_5+b_6(\varepsilon-\varepsilon_5)^2]d\varepsilon=\sigma_4(\varepsilon_5-\varepsilon_4)+\frac{E_{bt}\varepsilon_5^2}{2}-E_{bt}\varepsilon_4(\varepsilon_5-\varepsilon_4)+$$

$$+\frac{b_4}{m_4+1}(\varepsilon_5-\varepsilon_4)^{m_4+1}+\sigma_5(\varepsilon_7-\varepsilon_5)+\frac{b_6}{3}(\varepsilon_7^3-\varepsilon_5^3)+b_6\varepsilon_7\varepsilon_5(\varepsilon_5-\varepsilon_7).$$

Подстановка значений, соответствующих осредненной диаграмме, дает оценку относительной погрешности $\delta\approx\frac{W_{rt}^{0}-W_{rt}^{1}}{W_{rt}^{1}}\approx 0{,}0716$, что свидетельствует о том, что параболическая аппроксимация приемлема и состоятельна в сравнении со сплайн-аппроксимацией. Поэтому в дальнейшем используется упрощенная параболическая аппроксимация.

**Заключение.** Разработан новый метод построения нечетких аппроксимаций диаграмм деформирования материалов, в частности бетона. Методы кластеризации впервые применены для определения координат интерполяционных узлов аппроксимирующих функций как нечетких величин и построения функции-мажоранты и функции-миноранты. Нечеткие аппроксимации предполагается в дальнейшем применить к решению задачи о возникновении, стабилизации и росте трещин в нечеткой постановке. В качестве исходного материала использованы результаты экспериментальных исследований деформирования бетонных и железобетонных образцов — «восьмерок» при центральном растяжении и четырехточечном изгибе балок.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. Адищев, В.В. Проектирование экспертной системы оценки эксплуатационной пригодности зданий и сооружений [Текст] / В.В. Адищев, Д.Е. Пальчунов, Д.С. Шмаков // Вест. НГУ. Сер. Информационные технологии. — 2009, июль. — С. 175–187.
2. Адищев, В.В. Энергетический подход к моделированию процесса образования трещин в изгибаемых железобетонных элементах [Текст] / В.В. Адищев, В.М. Митасов // Изв. вузов. Строительство. — 2005. — № 4. — С. 26–31.
3. Митасов, В.М. Основные положения энергетической теории сопротивления железобетона [Текст] / В.М. Митасов, В.В. Адищев // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 6. — С. 3–8.
4. Штовба, С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB [Текст] / С.Д. Штовба. — М. : Горячая линия–Телеком, 2007. — 288 с.



*АДИЩЕВ Владимир Васильевич, д-р техн. наук, проф.*
*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*
*ШМАКОВ Дмитрий Сергеевич, асп.*
*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*



Получено 27.01.12



**Adishchev Vladimir Vasilievich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
**Shmakov Dmitriy Sergeevich**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## APPLICATION OF CLUSTER ANALYSIS FOR CONSTRUCTION OF FUZZY APPROXIMATIONS OF THE DEFORMATION CURVES OF CONCRETE

In the present work have been maked the attemp of developing methods of constructing fuzzy approximations diagrams deformation of materials, particularly concrete. The fuzzy approximations are supposed in what follows to apply to solving the task of emergence, stabilization and growth of cracks in the fuzzy formulation.

K e y w o r d s: unformalized problems, bearing ability, operational suitability, cluster analysis.

REFERENCES

1. A d i s c h e v, V.V. Designing of expert system of an estimation of operational suitability of building designs and constructions [Text] / V.V. Adischev, D.E. Pal'chunov, D.S. Shmakov // Herald NSU. — 2009. Ser. Informatical Technology. — 2009, July. — P. 175–187.
2. A d i s c h e v, V.V. Energy approach to modeling the process of cracking in reinforced concrete flexural elements [Text] / V.V. Adischev, V.M. Mitasov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2005. — N 4. — P. 26–31.
3. M i t a s o v, V.M. Main provisions of the energy theory of resistance of reinforced concrete [Text] / V.M. Mitasov, V.V. Adischev // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 6. — P. 3–8.
4. S h t o v b a, S.D. Designing of Fuzzy Systems by Means of MATLAB [Text] / S.D. Shtovba. — M. : Hot Line–Telecom, 2007. — 288 p.

УДК 536.25.001.24

А.М. ЗИГАНШИН, В.Н. ПОСОХИН, С.В. РОМАНОВ

# ТЕСТИРОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ СВОБОДНОЙ И ПРИСТЕНОЧНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ ЧИСЛЕННОМ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ О КОНВЕКЦИИ У ВЕРТИКАЛЬНОЙ НАГРЕТОЙ СТЕНКИ

Численно решается задача о свободно-конвективном течении, возникающем у равномерно нагретой вертикальной пластины. Находятся профили продольной скорости и избыточной температуры в потоке, а также зависимости для определения теплоотдачи пластины. Численная схема решения верифицируется путем сопоставления полученных результатов с известными данными других авторов.

Ключевые слова: вертикальная пластина, конвекция, Fluent, численное решение, модели турбулентности, тестирование.

Условные обозначения:

$u$ — скорость, м/с;

$u'_i$ — пульсация $i$-й компоненты скорости, м/с;

$T$ — температура, К;

$h$ — высота пластины, м;

$x$ — координата вдоль пластины, м;

$y$ — координата по нормали к пластине, м;

$l$ — характерный размер, м;

$Q$ — тепловой поток, Вт;

$q$ — удельный тепловой поток, Вт/м$^2$;

$k = \overline{u'_i u'_i}/2$ — кинетическая энергия турбулентных пульсаций, м$^2$/с$^2$;

$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j}\frac{\partial u'_i}{\partial x_j}}$ — диссипация энергии турбулентности, м$^2$/с$^3$;

$\omega \sim \varepsilon/k$ — удельная скорость диссипации турбулентности, 1/с;

$g$ = 9,81 — ускорение свободного падения, м/с$^2$;

$a$ — коэффициент температуропроводности, м$^2$/с;

$\alpha$ — коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м$^2$ · К);

$\beta$ — коэффициент температурного расширения, 1/К;

$\nu$ — коэффициент кинематической вязкости, м$^2$/с;

$\lambda$ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К);

$\mathrm{Nu} = \dfrac{\alpha l}{\lambda}$ — критерий Нуссельта;

$\mathrm{Gr} = \dfrac{g\beta(T_{\text{ст}} - T_\infty)l^3}{\nu^2}$ — критерий Грасгофа;

Pr = $\nu/a$ = 0,744 — молекулярный критерий Прандтля;

Ra = GrPr — критерий Рэлея.

Индексы: ст — относящийся к стенке, поверхности пластины; ∞ — относящийся к жидкости на удалении; $k$ — относящийся к $k$-й ячейке расчетной сетки; $x$ — местный, локальный, относящийся к сечению $x$; конв — конвективный; lam — ламинарный; turb — турбулентный.

© Зиганшин А.М., Посохин В.Н., Романов С.В., 2012

Течения, возникающие у теплоисточников, во многом определяют общее движение воздушных масс в помещениях. Восходящие потоки над отопительными приборами используют для защиты зоны обитания от ниспадающих токов охлажденного воздуха у наружных ограждений. Для решения такого рода задач необходимо знать характеристики конвективных потоков. Аналитический их расчет при реальной геометрии источников тепла и областей, в которых реализуется течение, крайне сложен. При проведении натурного эксперимента также довольно трудно обеспечить учет всех факторов.

Сегодня большое распространение получили методы вычислительной гидродинамики, которые позволяют моделировать разные гидродинамические явления. Основной проблемой в этих случаях является верификация (настройка) численной схемы решения — всего комплекса математических моделей. Настройка возможна путем сравнения численного решения тестовой задачи с аналитическим решением или с экспериментом, результаты которых известны как достоверные.

В этой статье верифицируется численная схема решения тестовой задачи о свободно-конвективном течении у бесконечной вертикальной равномерно нагретой пластины. Решение проводится при помощи вычислительного комплекса Fluent. Эта задача хорошо и подробно исследована. При достаточной высоте пластины у ее поверхности можно наблюдать все режимы течения — ламинарный вначале поток далее турбулизуется и при некотором критическом значении Ra переходит в турбулентный.

Одними из первых работ здесь можно считать эксперименты Шмидта и Бекмана [1] и Сондерса [2], а из аналитических — решение Польгаузена в [1] и работы Эккерта и Джексона [3] и Остраха [4]. Большое количество работ, связанных с этой темой, приходится на 1960–1980 годы. Это эксперименты Чизрайта, Тцуи и Нагано, Ворнера и Арпачи, из отечественных исследователей — М.А. Михеева[1–4]. Из аналитических работ можно отметить статью Черчилля и Чу[5]. В последнее время основное внимание стало уделяться разработке численных методов. При этом использовались как методы решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса (*RANS*)[6,7], так и в более поздних работах — прямое численное моделирование (*DNS*)[8,9]. Имеются также и современные на-

---

[1] Cheesewright R. Turbulent natural convection from a vertical plane surface // University of Michigan. Laboratory for Fluid Flow and Heat Transport Phenomena. Technical Report N 05031-8-T. 1967. 27 p.

[2] Tsuji T., Nagano Y. Characteristics of a turbulent natural convection boundary layer along a vertical flat plate // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 1988. V. 31, N 8. P. 1723–1734.

[3] Warner C.Y., Arpaci V.S. An experimental investigation of turbulent natural convection in air at low pressure along a vertical heated flat plate // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 1968. V. 11, N 3. P. 397–406.

[4] Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. Изд 2-е. 344 с.

[5] Churchill S.W., Chu H.H.S. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 1975. V. 18, N 11. P. 1323–1329.

[6] To W.M., Humphrey J.A.C. Numerical simulation of buoyant, turbulent flow—I. Free convection along a heated, vertical, flat plate // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 1986. V. 29, N 4. P. 573–592.

[7] Tieszen S., Ooi A., Durbin P. Modeling of natural convection heat transfer // Proc. of Summer Program: Center for Turbulence Research, 1998.

[8] Kasagi N. Progress in direct numerical simulation of turbulent transport and its control // Intern. J. of Heat and Fluid Flow. 1998. V. 19, N 2. P. 125–134.

[9] Abedin M.Z., Tsuji T., Hattori Y. Direct numerical simulation for a time-developing natural-convection boundary layer along a vertical flat plate // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2009. V. 52, N 19–20. P. 4525–4534.

турные эксперименты, например работа Ю.С. Чумакова[10]. В перечисленных работах определяются осредненные и пульсационные характеристики конвективного течения — избыточные температуры и продольные скорости, а также зависимости для теплообмена пластины при разных режимах течения.

В настоящей работе решается задача для вертикальной пластины высотой $h$ от 0,1 до 3 м. Температура на поверхности изменялась от 297,15 до 393,15 К. В таблице приведены исходные параметры — $T_{ст}$, $h$, а также полученные в результате расчета — средний удельный тепловой поток $\overline{q}^{конв}$, средние числа Нуссельта и Рэлея.

| № задачи | $T_{ст}$, К | $h$, м | $\overline{q}^{конв}$, Вт/м$^2$ | $\overline{Nu}$ | $\overline{Ra}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 297,15 | 0,1 | 17,7 | 18,30 | $4{,}42 \cdot 10^5$ |
| 2 | 297,15 | 0,5 | 9,6 | 49,35 | $5{,}53 \cdot 10^7$ |
| 3 | 297,15 | 1 | 7,8 | 80,72 | $4{,}42 \cdot 10^8$ |
| 4 | 297,15 | 3 | 6,9 | 215,39 | $1{,}19 \cdot 10^{10}$ |
| 5 | 332,15 | 3 | 143,6 | 456,30 | $1{,}16 \cdot 10^{11}$ |
| 6 | 393,15 | 3 | 513,1 | 636,11 | $2{,}98 \cdot 10^{11}$ |

Границе, моделирующей нагретую пластину, назначалось граничное условие — «Стенка» (*Wall*), остальные границы моделировались проницаемыми при помощи граничного условия «Давление на выходе» (*Pressure Outlet*) с установленным избыточным давлением, равным нулю.

При численном моделировании свободной конвекции было использовано обычное предположение относительно изменения плотности воздуха в зависимости от температуры (модель Буссинеска) — плотность считается постоянной во всех уравнениях, за исключением слагаемого, отвечающего за силы плавучести.

В общую систему уравнений турбулентного движения включалось и уравнение переноса лучистой энергии, при решении которого использовалась модель дискретных ординат.

Для моделирования турбулентных течений Fluent предлагает различные модели турбулентности: $k$–ε-модели — стандартная (*Standard*), ренормализованных групп (*RNG*), реализуемая (*Realizable*); $k$–ω-модель и модель рейнольдсовых напряжений (*Reynolds Stress Model — RSM*).

Большое значение имеет правильное моделирование потока в пристенном погранслое. Для этого в комплексе Fluent имеются три варианта пристеночных моделей — стандартные пристеночные функции (*Standard Wall Functions — SWF*), неравновесные пристеночные функции (*Nonequilibrium Wall Functions — NeWF*) и расширенное пристеночное моделирование (*Enhanced Wall Treatments — EWT*).

Задачи решались с использованием перечисленных выше моделей турбулентности и вариантами пристеночного моделирования. В результате решения построены графики изменения продольной скорости и избыточной температуры при ламинарном режиме (рис. 1 и 2) — начальные сечения пластины высотой 3 м ($Ra_x < 10^9$). На рисунках для сравнения приведены результаты эксперимента [1] и аналитического решения [4].

На рис. 3 и 4 приведены результаты решения с разными вариантами моделей турбулентности и пристеночного моделирования для турбулент-

[10] Чумаков Ю.С. Экспериментальное исследование свободно-конвективного течения около вертикальной поверхности // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. 2004. № 2. С. 103–116.

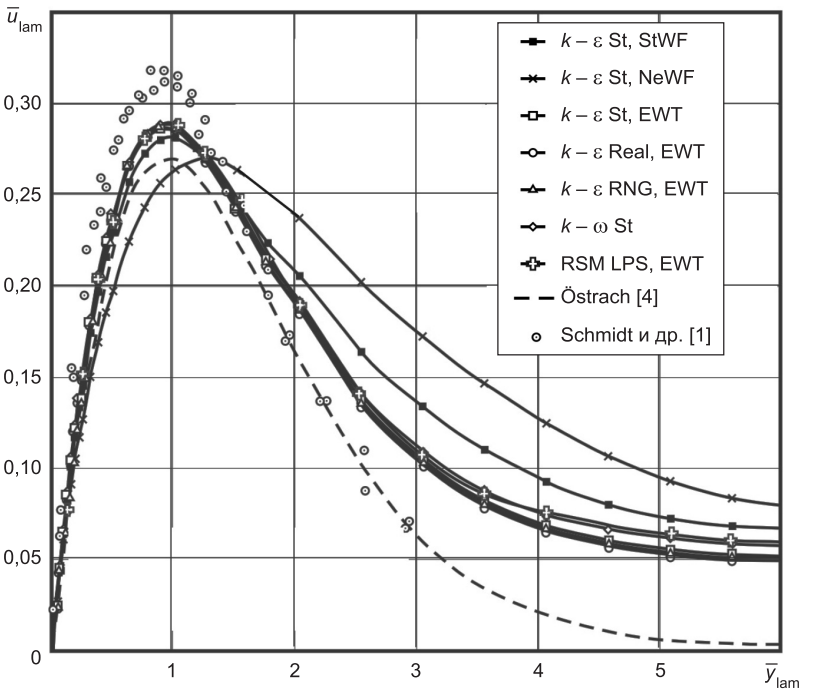



*Рис. 1.* Профиль безразмерной продольной скорости $\overline{u}_{\text{lam}}$

$$\overline{u}_{\text{lam}} = \frac{ux}{2\nu\sqrt{\text{Gr}_x}}; \quad \overline{y}_{\text{lam}} = \left(\frac{y}{x}\right)\left(\frac{\text{Gr}_x}{4}\right)^{1/4}$$

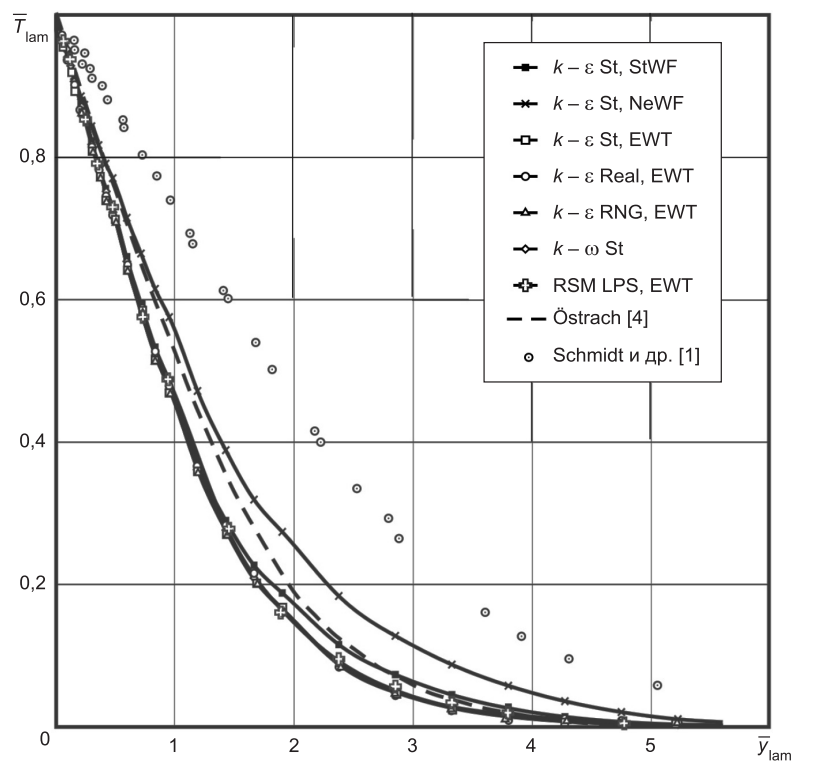



*Рис. 2.* Профиль избыточной температуры $\overline{T}_{\text{lam}}$

$$\overline{T}_{\text{lam}} = \frac{T - T_\infty}{T_{\text{ст}} - T_\infty}; \; \overline{y}_{\text{lam}} = \left(\frac{y}{x}\right)\left(\frac{\text{Gr}_x}{4}\right)^{1/4}$$

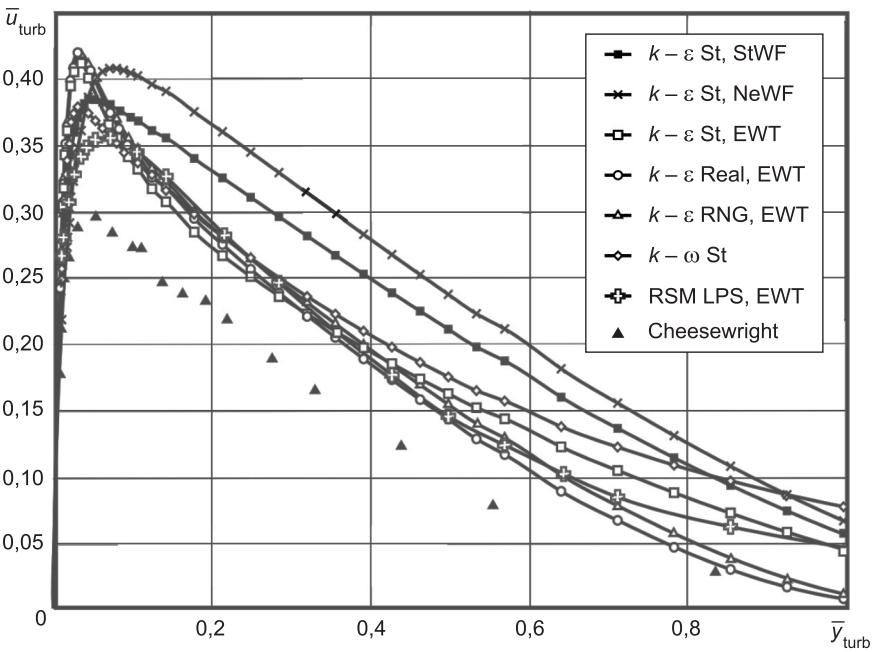



*Рис. 3.* Профиль безразмерной продольной скорости $\overline{u}_{\text{turb}}$

$$\overline{u}_{\text{turb}} = \frac{ux}{\nu\sqrt{\text{Gr}_x}};\ \overline{y}_{\text{turb}} = \left(\frac{y}{x}\right)\text{Gr}_x^{0,1}$$

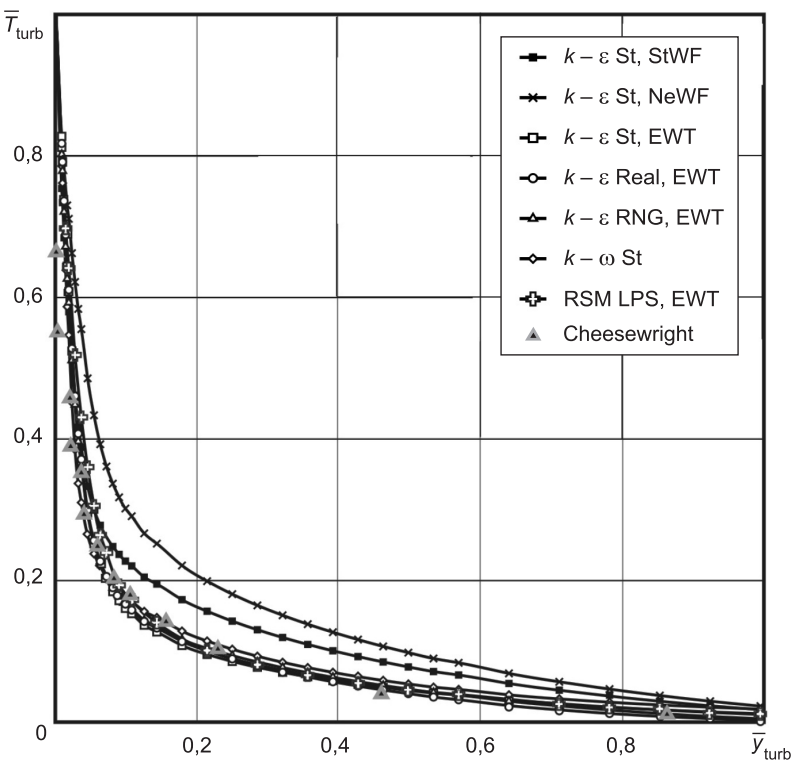



*Рис. 4.* Профиль избыточной температуры $\overline{T}_{\text{turb}}$

$$\overline{T}_{\text{turb}} = \frac{T - T_\infty}{T_{\text{ст}} - T_\infty};\quad \overline{y}_{\text{turb}} = \left(\frac{y}{x}\right)\text{Gr}_x^{0,1}$$

ного режима (сечения выше 1 м, $Ra_x > 10^9$). Здесь для сравнения использованы результаты эксперимента, выполненного Чизрайтом.

Видно, что наиболее близкие к ранее известным получаются результаты при использовании модели турбулентности рейнольдсовых напряжений в комплексе с расширенным пристеночным моделированием (*RSM EWT*). Тот факт, что скорость в струйном подслое не стремится к нулю, как это должно быть, связан со спецификой задания граничного условия на нижней границе области (*Pressure Outlet*) — воздух через эту границу втекает по нормали. В остальном как характер, так и значения продольной скорости и избыточной температуры хорошо совпадают с известными результатами других авторов, расхождение не превышает 14 %.

Кроме расчета характеристик течения, возникающего у пластины, также важно и правильное моделирование теплоотдачи. Обычно зависимость для теплоотдачи представляется в виде $Nu = cRa^n$. Здесь $c$ и $n$ — коэффициенты, зависящие от типа и режима течения. Из упрощенных аналитических решений найдено, что для ламинарных свободно-конвективных потоков $n = 1/4$ [1, 4], а для турбулентных $n = 1/3$. Значения же коэффициента $c$ у разных авторов могут сильно различаться.

Отдельно можно отметить работу Черчилля и Чу, где выведена зависимость среднего числа Nu для широкого диапазона чисел Ra (0,1 до $10^{12}$) и Pr (0,004 до 100):

$$\overline{Nu}^{1/2} = 0{,}825 + [0{,}387 \cdot Ra^{1/6} / (1 + (0{,}492 / Pr)^{9/16})^{8/27}],$$

а также работу Ю.С. Чумакова, где в результате аппроксимации экспериментальных данных получены зависимости для локального числа Nu при всех режимах, в том числе и переходном:

$$Nu_x = 0{,}279\,Gr_x^{0{,}262} \quad \text{при} \quad Gr_x = 5 \cdot 10^5 \ldots 2{,}8 \cdot 10^9,$$
$$Nu_x = 3{,}75 \cdot 10^{-11}\,Gr_x^{1{,}304} \quad \text{при} \quad Gr_x = 3{,}5 \cdot 10^9 \ldots 6{,}3 \cdot 10^9,$$
$$Nu_x = 0{,}0547\,Gr_x^{0{,}361} \quad \text{при} \quad Gr_x = 1{,}4 \cdot 10^{10} \ldots 5 \cdot 10^{11}.$$

Далее на рис. 5 и 6 представлены известные критериальные зависимости для локального и среднего чисел Nu.

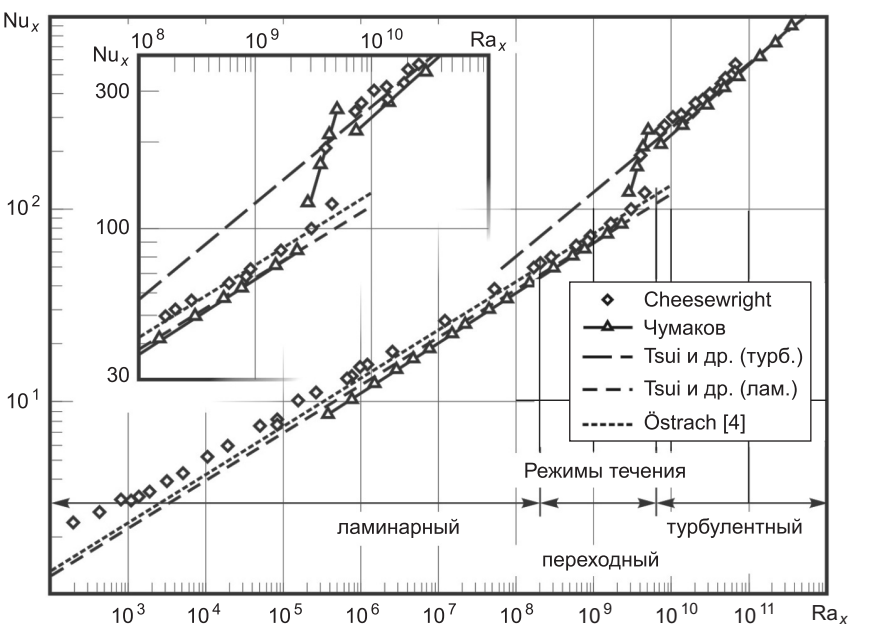



*Рис. 5.* Изменение локального числа $Nu_x$

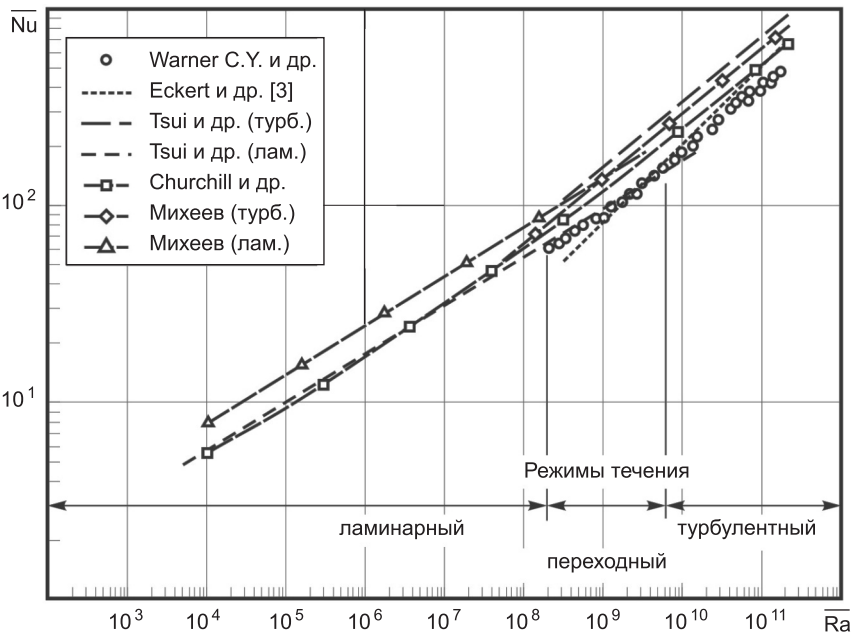



*Рис. 6.* Изменение среднего числа $\overline{\mathrm{Nu}}$

В данной работе по результатам численного расчета определялась локальная конвективная теплоотдача каждой ячейки расчетной сетки $Q^{\text{конв}}$ (с координатой центра $x$ и длиной $\Delta x$, м) как разность между полным и радиационным тепловыми потоками этой ячейки. Затем по величине удельного локального конвективного потока $q_k^{\text{конв}} = Q_k^{\text{конв}} / \Delta x$ (Вт / м$^2$) вычислялось локальное значение числа $\mathrm{Nu}_x$, а по $T_{\text{ст}}$ — числа $\mathrm{Ra}_x$, при этом за характерный размер принималась текущая координата $x$, а все теплофизические свойства воздуха вычислялись при температуре $(T_{\text{ст}} - T_\infty)/2$. Средние числа $\overline{\mathrm{Nu}}$ и $\overline{\mathrm{Ra}}$ определялись аналогично локальным, только вместо удельной локальной теплоотдачи $q_k^{\text{конв}}$ использовалась удельная средняя конвективная теплоотдача пластины $\overline{q}^{\text{конв}}$ от ее начала до текущей высоты $x$.

На рис. 7 и 8 приведено изменение локального и среднего чисел Nu в зависимости от Ra, полученное при разных моделях турбулентности и вариантах пристеночного моделирования. В виде заштрихованной области там же нанесены данные других авторов. Из рис. 7 видно, что вне зависимости от модели при использовании расширенного пристеночного моделирования ($EWT$) хорошо отражается характер изменения локального числа Nu, в том числе виден перегиб в переходном режиме, хотя и начинающийся при несколько меньших значениях $\mathrm{Ra}_x$: $\sim 2 \cdot 10^8 ... 10^9$ вместо $3 \cdot 10^9 ... 6 \cdot 10^9$, как это видно из результатов других авторов.

На рис. 8 видно, что все модели в комплексе с расширенным пристеночным моделированием ($EWT$) хорошо описывают изменение средней теплоотдачи в зависимости от числа $\overline{\mathrm{Ra}}$.

Таким образом, при решении тестовой задачи о свободно-конвективном течении у равномерно нагретой вертикальной пластины определена численная схема решения, наиболее адекватно воспроизводящая данное явление. В качестве модели турбулентности нужно использовать модель

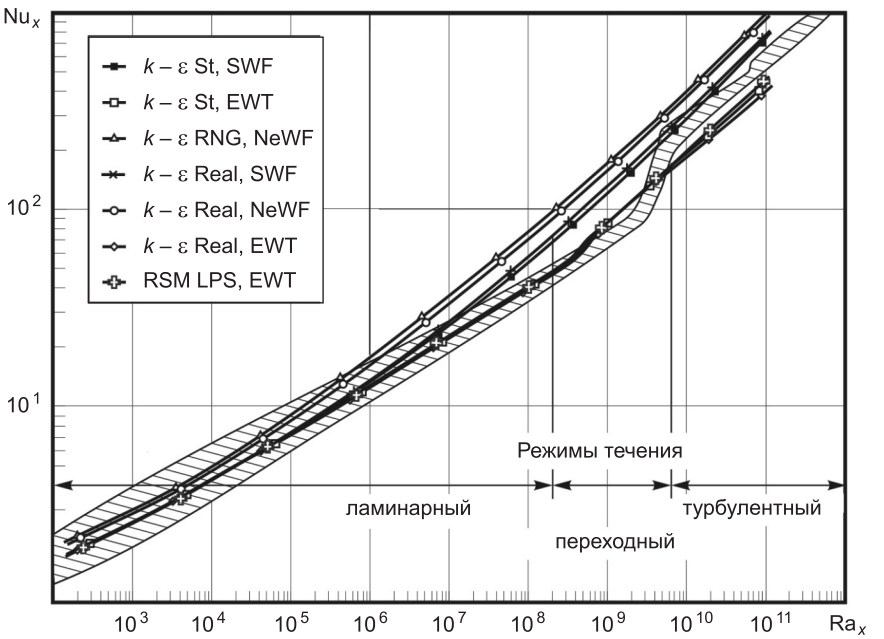



*Рис. 7.* Изменение локального числа $\mathrm{Nu}_x$

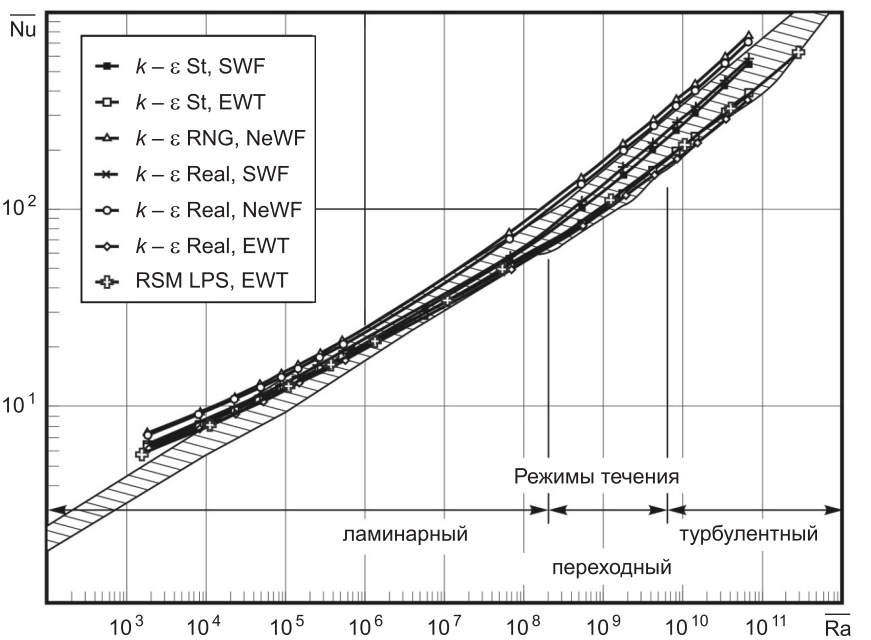



*Рис. 8.* Изменение среднего числа $\overline{\mathrm{Nu}}$

турбулентности рейнольдсовых напряжений (*RSM*), при этом необходимо расширенное пристеночное моделирование (*EWT*).

Использование такой схемы численного расчета далее позволит наиболее обоснованно переходить к численному исследованию конвективных течений над теплоисточниками разной формы, в том числе развивающихся в замкнутых областях. Знание характеристик подобных течений позволит наиболее рационально и энергоэффективно проектировать системы отопления, вентиляции и кондиционирования зданий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Schmidt, E. Das temperatur- und geschwindigkeitsfeld vor einer wärme abgebenden senkrechten platte bei natürlicher konvektion [Text] / E. Schmidt, W. Beckmann // Technische Mechanik und Thermodynamik. — 1930. — Vol. 1, N 11. — P. 391–406.
2. Saunders, O.A. The effect of pressure upon natural convection in air [Text] / O.A. Saunders // Proc. of the Royal Society A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences. — 1936. — V. 157, N 891. — P. 278–291.
3. Eckert, E.R.G. Analysis of turbulent free convection boundary layers on flat plate [Text] / E.R.G. Eckert, T.W. Jackson // NACA, TN 2207. — 1950. — 22 p.
4. Östrach, S. An analysis of laminar free-convection flow and heat transfer about a flat plate parallel to the direction of the generating body force [Text] / S. Östrach // NACA, TR 1111. — 1953. — P. 63–78.

*ЗИГАНШИН Арслан Маликович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: amziganshin@kgasu.ru*
*Казанский государственный архитектурно-строительный университет*
*ПОСОХИН Владимир Николаевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: posohin@kgasu.ru*
*Казанский государственный архитектурно-строительный университет*
*РОМАНОВ Станислав Викторович, ассист.; E-mail: krechet_2001@mail.ru*
*Казанский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 01.03.12

**Ziganshin Arslan Malicovich,** candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: amziganshin@kgasu.ru, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia
**Posokhin Vladimir Nikolaevich,** doctor of technical sciences, professor; E-mail: posohin@kgasu.ru, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia
**Romanov Stanislav Victorovich,** assistant; E-mail: krechet_2001@mail.ru, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

## VERIFICATION OF FREE AND NEAR-WALL TURBULENCE MODELS IN NUMERICAL SOLUTION OF CONVECTION NEAR THE HEATED WALL

The free-convective flow near the uniformly heated vertical plate numerically solved. The profiles of longitudinal velocity and excess temperature of flow, and dependences of heat transfer of plate are determined. The numerical solution scheme is verified by comparing the results with the known data of other authors.

Key words: vertical plate, convection, Fluent, numerical solution, models of turbulence, verification.

УДК 624.137

А.П. КРИВОРОТОВ, П.В. ЗУБАЧЕВ

# ПРАКТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ГИБКОЙ ШПУНТОВОЙ СТЕНЫ ПРИ ЯРУСНОМ РАСПОЛОЖЕНИИ АРМОЭЛЕМЕНТОВ

Ярусное расположение армоэлементов смещает поверхности обрушения вглубь откоса. Пригрузка поверхности откоса приводит к изгибу армоэлементов и шпунтовой стены. Расчеты усилий в конструкциях ограждения выполняются известными методами с применением табличных коэффициентов.

Ключевые слова: гибкое ограждение, рациональная конструкция, простые методы расчетов.

Рассматривается шпунтовое ограждение, подкрепленное армоэлементами, образующими горизонтальные ярусы («пластины»). Расстояние между соседними армоэлементами в ярусе равно $3d$; $d$ — диаметр или ширина армоэлементов, образующих ярус. Армоэлементы соединены со шпунтовой стеной шарнирно. Длина $l$ армоэлементов уточняется расчетом, начальный размер $l = 0{,}5H$; $H$ — высота поддерживаемого шпунтом откоса. Оптимальное расстояние $h$ между ярусами армоэлементов определяется расчетом. Рассматривается схема плоской деформации сооружения.

Технология производства работ по устройству огражденного шпунтом котлована такова:

— по контуру котлована выполняется гибкое шпунтовое ограждение;

— производится экскавация грунта до глубины, достаточной для устройства в откосе армоэлементов первого яруса;

— выполняется подкрепление шпунтовой стены армоэлементами первого яруса;

— производится экскавация грунта до глубины, достаточной для устройства в откосе армоэлементов второго яруса;

— выполняется подкрепление шпунтовой стены армоэлементами второго яруса;

— производится экскавация и подкрепление стены последующими ярусами армоэлементов до проектной глубины котлована.

Внедрение армоэлементов и устройство ярусов из армоэлементов, связанных со шпунтовой стеной, влечет за собой изменение схемы воздействия грунтового откоса на ограждение.

Грунт откоса, расположенный между ярусами, образует примыкающий к шпунтовой стене массив, ограниченный ярусами и стеной, с напряженным состоянием, которое не может быть предельным по прочности. При потере устойчивости сооружения поверхности обрушения образуются за пределами расположения армоэлементов, смещаясь вглубь откоса. Области, примыкающие к стене, образуют массив, связанный с ограждением; по его подошве возникают дополнительные силы трения, увеличивающие устойчивость сооружения.

© Криворотов А.П., Зубачев П.В., 2012

Последовательность образования поверхностей обрушения при поэтапной разработке котлована и подкреплении стены армоэлементами выглядит следующим образом. После первого этапа экскавации грунта до момента установки армоэлементов призма обрушения формируется по традиционной схеме [1, п. 7.3.2]. После установки армоэлементов первого яруса и последующей экскавации грунта возможно образование призмы обрушения по линии $11_1 1_2$ (рис. 1). После установки армоэлементов второго яруса и последующей экскавации грунта реализация поверхности обрушения по линии $11_1 1_2$ становится невозможной, появляется возможность появления поверхности обрушения $22_1 2_2$. Подобное явление повторяется и после установки армоэлементов третьего яруса и последующей экскавации грунта до уровня дна котлована; в этом случае формируется призма обрушения, ограниченная сбоку поверхностью $33_1 3_2$ и подошвой призмы $3_2 4$. Ломаные поверхности сдвига принимаются условно; как показали опыты, они обычно имеют криволинейные очертания, например круглоцилиндрические (рис. 1, кривая $3'_1 4$) с центром вращения в определенной точке (точка $O_1$) и радиусом вращения $r$.

Величину пригрузки каждого яруса весом вышележащего грунта и реактивный отпор шпунтовой стены в пределах между ярусами можно установить аналитическим или графическим методом — путем построе-

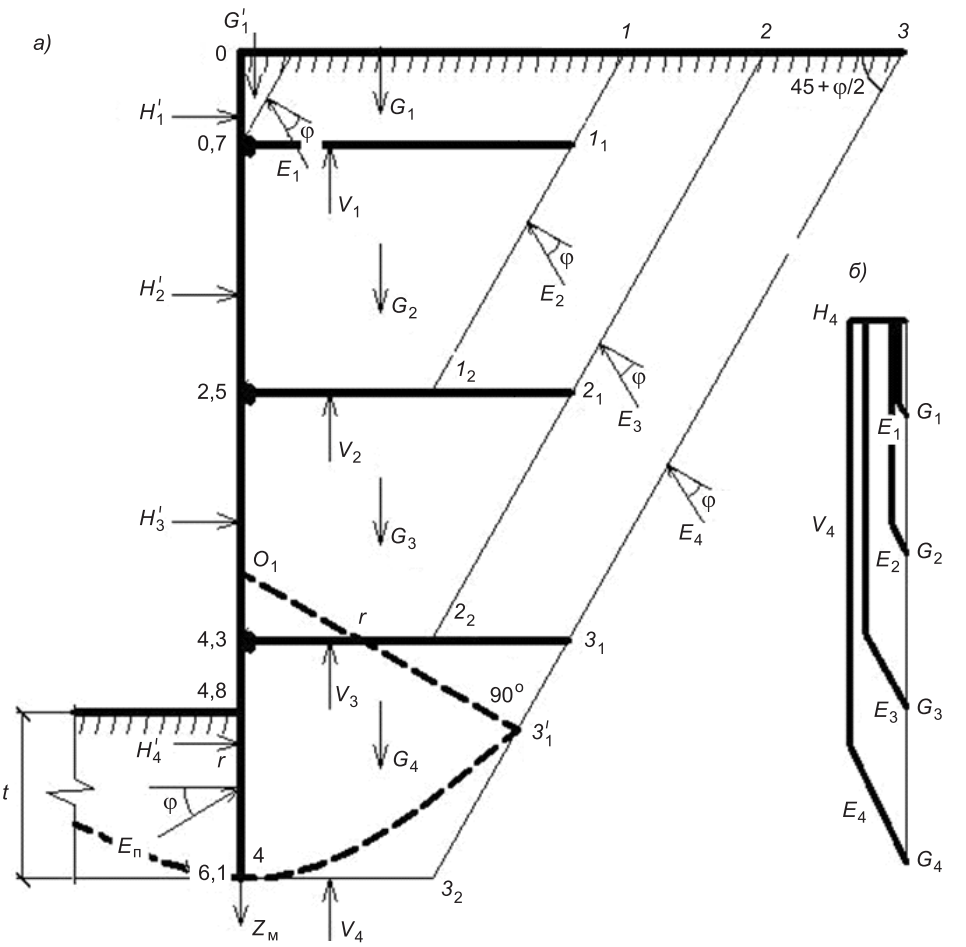



*Рис. 1.* Схема образования поверхностей обрушения при поэтапной экскавации грунта и ярусной установке армоэлементов (*а*); силовые многоугольники для определения величины давления на армоэлементы $V_i$ и шпунт $H_i$, $i = 1–4$ (*б*)

ния многоугольников сил, действующих на ограждение на каждом этапе экскавации грунта в котловане.

На рис. 1 показаны расчетная схема последовательного (в ходе экскавации грунта) образования поверхностей обрушения (возникающих за счет изгиба шпунта) и многоугольники сил, обеспечивающих условия равновесия образующихся призм обрушения. Расчеты выполнены при следующих исходных данных:

— глубина котлована $H$ = 4,8 м;

— заглубление шпунта ниже дна котлована $t$ = 1,3 м;

— верхний ярус армоэлементов расположен на 0,7 м ниже поверхности откоса, последующие два яруса — через 1,8 м;

— длина армоэлементов $l = 0{,}5H$ = 2,4 м;

— шаг армоэлементов в ярусе $b = 3d$, $d$ = 0,155 м;

— соединение армоэлементов со шпунтовой стеной — шарнирное, армоэлементы расположены горизонтально;

— грунт откоса и основания стены — рыхлый слабый песок с удельным весом $\gamma$ = 16 кН/м$^3$, углом внутреннего трения $\varphi = 32°$, сцеплением $c$ = 0, модулем деформации песка $E_0$ = 500 кПа.

Равнодействующие давлений $H_i$ на шпунт при поэтапном удалении грунта приведены в табл. 1. Давления $H_i$ грунта на участках между соседними ярусами устанавливаются как разность значений $H$ при последовательном изменении положения поверхности обрушения в ходе экскавации грунта.

Таблица 1

**Равнодействующие давлений $H_i$ грунта на отдельных участках шпунта при поэтапной экскавации грунта**

| Участки шпунта на глубине, $z_м$, м | 0...0,7 | 0,7...2,5 | 2,5...4,3 | 4,3...6,1 |
|---|---|---|---|---|
| $H_i$ кН/м п. | 1,2 | 14,0 | 30,0 | 47,0 |

После завершения работ по устройству ограждения котлована коэффициент запаса устойчивости на опрокидывание вокруг точки *4* (рис. 1) $K_1$ = 2,8, на сдвиг по плоскости $43_2$ $K_2$ = 1,6 (без учета пассивного отпора). Как видно, в данном случае более вероятна потеря устойчивости сооружения в форме сдвига, трение по подошве «жесткого» массива грунта можно увеличить за счет увеличения заглубления шпунта и длины армоэлементов, пригрузки на поверхности откоса (над армоэлементами). Общую устойчивость ограждения на глубинный сдвиг следует проверить методом круглоцилиндрических поверхностей скольжения.

При устройстве армоэлементов путем их забивки в откос или изготовлении в предварительно выполненных скважинах вышележащий слой стабилизированного грунта не вызывает их изгиба или дополнительных смещений. Армоэлементы лишь сопротивляются выдергивающим усилиям, возникающим только при дальнейшей поэтапной отрывке котлована (табл. 1, усилия $H_i$). Удерживающие силы трения армоэлементов по грунту можно предварительно оценить различными методами [1, п. 17.3], а более надежные результаты получаются при испытаниях армоэлементов на выдергивание в реальных условиях.

В условиях строительства нередко приходится пригружать поверхность откоса временной нагрузкой — грунтом, вынутым из котлована, строительными конструкциями, строительной техникой и т.п. В этом случае армоэлементы и шпунтовое ограждение пригружаются дополнительными нагрузками, деформируются, получаются дополнительные смеще-

ния, что требует их оценки для обеспечения нормальных условий эксплуатации сооружения.

Дополнительные усилия, деформации и смещения армоэлементов от временной равномерной нагрузки $q$ (рис. 2) могут быть установлены расчетом армоэлементов как гибких конструкций, расположенных на «упругом» (линейно-деформируемом) основании.

Рассмотрим случай действия нагрузки $q = 10$ кН/м$^2$ (рис. 2). При диаметре армоэлемента $d = 0{,}155$ м, соответствующем размерам пневмопробойника ИГД РАН, применяемого для устройства скважин, длине армоэлементов $l = 2{,}4$ м, их шаге $b = 3d$ в ярусе на 1 м п. ширины яруса приходится два армоэлемента с суммарным моментом инерции сечения $J = 3 \cdot 10^{-6}$ м$^4$. С учетом ранее упомянутого модуля деформации грунта откоса $E_0 = 500$ кН/м$^2$ и модуля упругости армобетона элемента

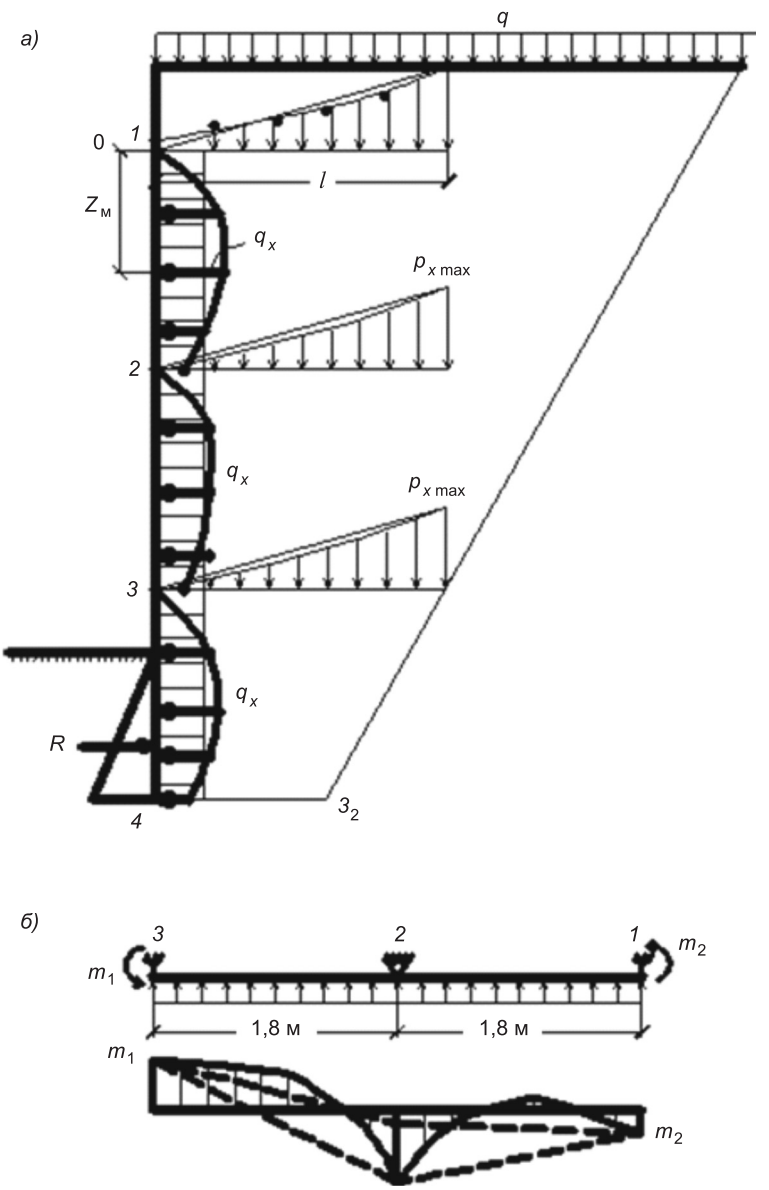



*Рис. 2.* Эпюры давлений $p_x$ под ярусами армоэлементов от действия поверхностей нагрузки $q$ и эпюры давлений $q_x$ на шпунтовую стену (*а*); расчетная схема и эпюра изгибающих моментов в шпунте (*б*)

$E = 2 \cdot 10^7$ кН/м$^2$ показатель гибкости $\alpha$ в работе И.А. Симвулиди [2] оказался равным 183, т.е. $\alpha \approx 200$.

От действия равномерной нагрузки $q = 10$ кН/м$^2$ на поверхности откоса каждый ярус армоэлементов будет пригружен такой же удельной нагрузкой, которая вызовет появление неравномерных реактивных давлений $p_x$ (рис. 2) по подошве каждого гибкого яруса (в расчете — «пластины»). Эти реактивные давления, являясь нагрузкой на нижележащий массив грунта, вызовут появление горизонтальных давлений $q_x$ на шпунтовую стену.

Реактивные давления под «пластиной» (в виде полосы шириной 1 м, длиной 2,4 м и с показателем гибкости $\alpha = 200$) определяются по методике И.А. Симвулиди [2, § 9]. Реакция в единственной неподвижной шарнирной «опоре» армоэлемента вычисляется по зависимости

$$Y = \frac{bl}{W_{11} + W_{13}},$$

где $W_{11}$ и $W_{13}$ — безразмерные коэффициенты. В рассматриваемом нами случае $Y = 4{,}58$ кН.

Далее, по методу, изложенному в монографии [2], пользуясь безразмерными табличными коэффициентами, в фиксированных сечениях $\xi = x/l$ по длине армоэлемента определяют реактивные давления $p_x$, поперечные силы $Q_x$, изгибающие моменты $M_x$, смещения $y_x$ и углы поворота. В этом случае используется принцип суперпозиции, справедливый при линейной зависимости между напряжениями и деформациями среды.

Эпюры реактивных давлений под «пластиной» имеют форму, близкую к треугольной, с максимальной ординатой $p_{x\,\max} = 17{,}7$ кПа (рис. 2). Из-за ограниченности объема статьи эпюры $p_x$, $Q_x$, $M_x$ не приводятся, при необходимости их можно получить по данным табл. 2.

Таблица 2

**Реактивные давления $p_x$ и усилия $Q_x$, $M_x$ в сечениях $\xi$ армоэлементов от действия дополнительной нагрузки $q$**

| Показатели | $\xi = x/1$ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0 | 0,2 | 0,4 | 0,6 | 0,8 | 1,0 |
| $p_x$, кПа | 2,0 | 5,2 | 6,6 | 7,8 | 10,8 | 17,7 |
| $Q_x$, кН | 4,6 | 0,8 | −0,1 | −1,5 | −1,9 | 0 |
| $M_x$, кН · м | 0 | 1,5 | 1,8 | 1,4 | 0,6 | 0 |

Для вычисления бокового давления $q_x$ на шпунтовую стену от действия давлений $p_x$, передающихся через подошву армоэлементов («пластины»), целесообразно нелинейную эпюру давлений $p_x$ заменить треугольной с сохранением максимальной ординаты $p_{x\,\max}$ (в данном случае $p_{x\,\max} = 17{,}7$ кН/м$^2$, табл. 2). Давления $q_x$ можно определить, используя модель основания в виде «упругой» (линейно-деформируемой) среды и полученные для этих целей таблицы безразмерных коэффициентов [3, гл. IV, § 2]. На глубине $z$ от подошвы армоэлемента в точках, соседних с поверхностью шпунтовой стены, давления $q_x$ приведены в табл. 3. Среднее значение давления на шпунтовую стену $q_{x\,\text{ср}} = 1{,}7$ кН/м$^2$.

Полученные эпюры $q_x$ показаны на рис. 2. Для упрощения операции определения внутренних усилий в шпунтовой стене вместо криволинейных эпюр давлений $q_x$ рекомендуется использование равномерно распре-

Таблица 3

**Горизонтальные давления $q_x$ на шпунтовую стену на глубине $z$ от подошвы армоэлементов**

| $z$, м | $\xi = z/l$ | $\bar{q}_x = q_x / P_{x\max}$ | $q_x$, кН/м$^2$ |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,48 | 0,2 | 0,14 | 2,5 |
| 0,96 | 0,4 | 0,14 | 2,5 |
| 1,44 | 0,6 | 0,11 | 2,0 |
| 1,80 | 0,75 | 0,09 | 1,6 |

деленной нагрузки $q_{x\text{ср}}$. При расчете неразрезной «балки», нагруженной давлением $q_{x\text{ср}}$, влияние нагрузки на ее консолях учитывается приложением сосредоточенных моментов $m_1$ и $m_2$ в сечениях «балки», расположенных над крайними опорами *1* и *3*. Отпор грунта $R$ со стороны дна котлована в расчетах опорного момента $m_1$ определяется упрощенно — в условиях отсутствия пассивного отпора и призмы выпирания (сооружение в целом находится в состоянии устойчивого равновесия). При этом реактивное усилие $R$ можно принять равным площади эпюры $q_{x\text{ ср}}$ на участке *34*, а линию действия усилия $R$ расположить на уровне центра тяжести треугольной эпюры реактивных давлений на заглубленном участке шпунтовой стены со стороны котлована.

Внутренние усилия в шпунтовой стене (по схеме рис. 2, *б*) определяются по правилам расчета статически неопределимых (неразрезных) балок (например, с применением уравнений трех моментов). Пролетные и опорные изгибающие моменты и поперечные силы можно определить также с помощью табличных коэффициентов, имеющихся в литературе, например, в монографии [4].

Лотковые эксперименты подтвердили кинематическую достоверность образования поверхностей обрушения при ярусном расположении армоэлементов за гибкими и жесткими ограждениями (рис. 3).

*Рис. 3*. Следы призмы обрушения за армогрунтовой «стеной»; высота откоса $H$ = 0,48 м, длина армоэлементов $l = 0{,}375H$, их диаметр $d$ = 6 мм, шаг по горизонтали $b = 3d$, по вертикали $h = 0{,}2H$

**Выводы.** 1. Предлагаемый ярусный способ расположения армоэлементов уменьшает расчетное боковое давление грунта на ограждение за счет смещения поверхностей обрушения вглубь откоса.

2. Предлагаемый метод расчета давлений грунта на ограждения дает возможность оценить устойчивость сооружения в процессе его возведения.

3. Разработан инженерный способ расчета дополнительных усилий в конструктивных элементах гибкого шпунтового ограждения, подкрепленного армоэлементами, при действии временных нагрузок на поверхности откоса. Необходимые при этом расчеты можно выполнять, используя имеющиеся расчетные методы с упрощенной (табличной) формой их представления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основания, фундаменты и подземные сооружения : справочник проектировщика. — М. : Стройиздат, 1985. — 479 с.
2. Симвулиди, И.А. Расчет инженерных конструкций на упругом основании [Текст] / И.А. Симвулиди. — М. : Высш. шк., 1973. — 431 с.
3. Флорин, В.А. Основы механики грунтов. Т. 1 [Текст] / В.А. Флорин. — М. : Госстройиздат, 1959. — 357 с.
4. Сахновский, К.В. Железобетонные конструкции [Текст] / К.В. Сахновский. — М. : Стройиздат, 1959. — 839 с.

*КРИВОРОТОВ Александр Петрович, д-р техн. наук, проф.*
*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*
*ЗУБАЧЕВ Павел Викторович, инж.*
*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено 02.03.12

**Krivorotov Alexandr Petrovich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
**Zubachyov Pavel Victorovich**, engineer, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## PRACTIKAL METHOD OF CALCULATION OF THE FLEXIBLE RETAINING WALL AT A LAYERED ARRANGEMENT OF REINFORCING ELEMENTS

The layered arrangement of reinforcing elements displaces surfaces of failure deep into a slope. Loading of a slope surface leads to a bend of the reinforcing elements and the flexible retaining wall. Calculations of strains in wall structures are carried out by known methods with application of tabular factors.

Key words: flexible retaining wall, rational structure, simple methods of calculations.

REFERENCES

1. Bases, foundations and underground structures : engineer directory [Text]. — M. : Stroyizdat, 1985. — 479 p. (in Russian)
2. Simvulidi, I.A. Calculation of engineering structures on the elastic basis [Text] / I.A. Simvulidi. — M. : Higher School, 1973. — 431 p. (in Russian)
3. Florin, V.A. Bases of Soil Mechanics. V. l [Text] / V.A. Florin. — M. : Gosstroyizdat, 1959. — 357 p. (in Russian)
4. Sakhnovsky, K.V. Ferroconcrete Structures [Text] / K.V. Sakhnovsky. — M. : Stroyizdat, 1959. — 839 p. (in Russian)

УДК 531.1

В.А. МОНАХОВ, Т.Ю. ПОТАПОВА

# ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ СКОРОСТИ СЛОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ ТОЧКИ

Предложена методика определения скорости сложного движения материальной точки, основанная на использовании матричной формы закона сложного движения. Процедура вычисления скорости заключается в дифференцировании по времени композиции матриц, составляющих результирующее матричное преобразование систем координат. Достоверность нового метода подтверждается решением типичной задачи о сложном движении точки в скалярном виде.

Ключевые слова: система координат, материальная точка, сложное движение точки, закон движения, матрица скорости, вектор скорости, матричное преобразование, дифференцирование матрицы.

Рассмотрение сложного движения материальной точки с позиций теории матричных преобразований систем координат, предложенное авторами в статье [1], может быть использовано не только для вывода закона сложного движения в матричной и скалярной форме. Оно пригодно и для определения скорости сложного движения точки в текущий момент времени в автоматическом режиме.

Преимущества указанного подхода несомненны, так как некоторые сложности вывода закона движения и вычисления скорости в матричной форме, обусловленные трудоемкостью операций с матрицами при ручном исполнении, легко преодолеваются применением ПЭВМ. К тому же предлагаемая концепция изучения сложного движения дает более полное представление о характере движения точки, чем классическая точка зрения, излагаемая в учебниках по теоретической механике.

Для продолжения исследования, посвященного определению скорости точки, снова обратимся к типичному примеру сложного движения точки $M$, относительное движение которой по кольцу радиуса $R$ совершается в соответствии с заданным законом $\alpha = s_r / R$, где $s_r = CM(t)$ — дуговая координата, $t$ — время. Кольцо, в свою очередь, вращается вокруг вертикальной оси $O\xi$ по известному закону $\varphi(t)$, характеризующему переносное движение точки (рис. 1, *а*).

Сложное движение точки с позиций теории матричных преобразований систем координат можно рассматривать как результат трех матричных преобразований подвижной системы координат $Oxyz$, первоначально совпадающей с положением глобальной системы $\Omega\eta\theta\xi$, осуществляемых в такой последовательности:

— поворот системы на угол $\alpha$ вокруг собственной оси $Oy$;

— перенос системы координат вдоль оси $O\eta$ на отрезок $\delta$;

— и еще один поворот системы координат вокруг вертикальной оси $O\xi$ на угол $\varphi$ в соответствии с законом переносного движения точки (рис. 1, *б*).

© Монахов В.А., Потапова Т.Ю., 2012

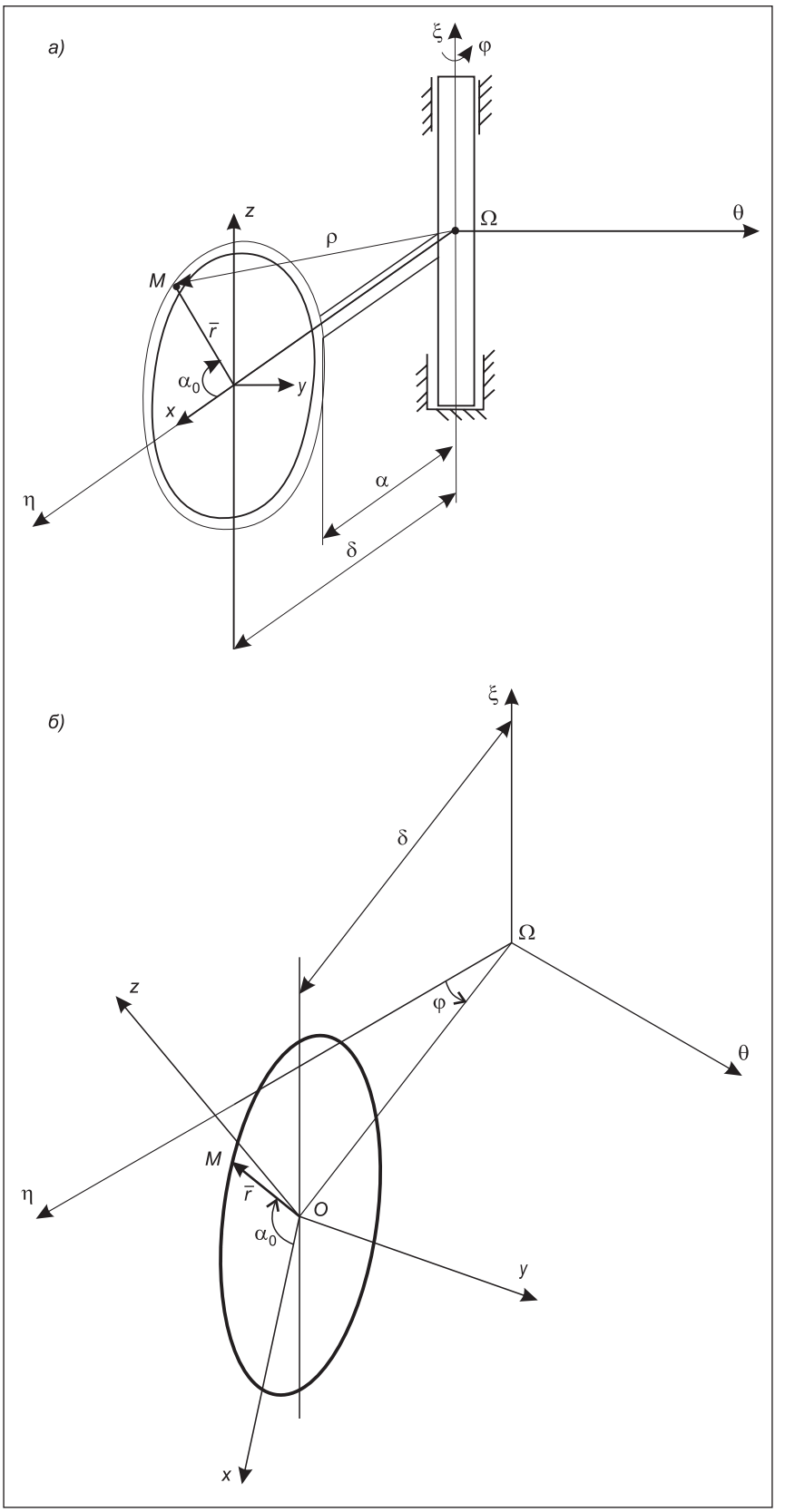



*Рис. 1*

Результирующее матричное преобразование $\bar{\rho} = [\Psi]\bar{r}$ определяется как композиция соответствующих матриц преобразований $[\alpha]$, $[\Delta]$ и $[\varphi]$, т.е. $[\Psi] = [\varphi]\,[\Delta]\,[\alpha]$; $\bar{r}$ — радиус-вектор точки $M$, заданный в подвижной системе координат, а радиус-вектор $\bar{\rho}$, очевидно, характеризует закон сложного движения точки $M$ относительно неподвижной системы координат $\Omega\eta\theta\xi$.

Вычислив произведение матриц

$$[\Psi]=[\varphi][\Delta][\alpha]=\begin{bmatrix}\cos\varphi & -\sin\varphi & 0 & 0\\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\times$$

$$\times\begin{bmatrix}1 & 0 & 0 & \delta\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}\cos\alpha & 0 & -\sin\alpha & 0\\ 0 & 1 & 0 & 0\\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix},$$

можно установить закон сложного движения точки в матричном виде

$$[\Psi] = \begin{bmatrix}\cos\alpha\cos\varphi & -\sin\varphi & -\sin\alpha\cos\varphi & \delta\cos\varphi\\ \cos\alpha\sin\varphi & \cos\varphi & -\sin\alpha\sin\varphi & \delta\sin\varphi\\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{bmatrix}. \qquad (1)$$

Далее, умножив матрицу $[\Psi]$ на вектор $\bar{r}$, т.е. определив компоненты вектора $\bar{\rho} = (\eta_M, \theta_M, \xi_M, 1)$, нетрудно перейти к скалярной записи закона сложного движения точки $M$:

$$\eta_M = [\delta + R\cos(\alpha + \alpha_0)]\cos\varphi,$$
$$\theta_M = [\delta + R\cos(\alpha + \alpha_0)]\sin\varphi,$$
$$\xi_M = R\sin(\alpha + \alpha_0).$$

При определении проекций вектора $\bar{\rho} = [\Psi]\bar{r}$ компоненты вектора $\bar{r} = (x, y, z, 1)$, заданного в локальной системе координат, были выражены через радиус $R$ кольца и угловую координату $\alpha_0$ точки $M$ в начальный момент времени $t_0$: $\bar{r} = (R\cos\alpha_0, 0, R\sin\alpha_0, 1)$. Необходимо заметить, что в последних формулах, в отличие от закона движения, выводимого при традиционном (аналитическом) решении, аргумент тригонометрических функций, заключенный в круглых скобках, представлен в виде суммы углов: переменного угла $\alpha$, соответствующего текущему моменту, и его начального значения $\alpha_0$. Данное разложение объясняется спецификой предлагаемого подхода к выводу закона сложного движения. Это, кстати, касается и формул для проекций скоростей (см. окончание статьи), где встречается та же сумма углов $\alpha + \alpha_0$.

Приняв достаточно большой интервал времени $T$ движения механической системы и раздробив его на малые отрезки времени $\Delta t = T/n$, где $n$ — степень дробления, и пользуясь полученными формулами, с помощью ПЭВМ несложно построить траекторию сложного движения точки $M$ (рис. 2).

Анализируя структуру закона сложного движения точки в матричной форме, можно сделать вывод о том, что не только траекторию, но и ско-

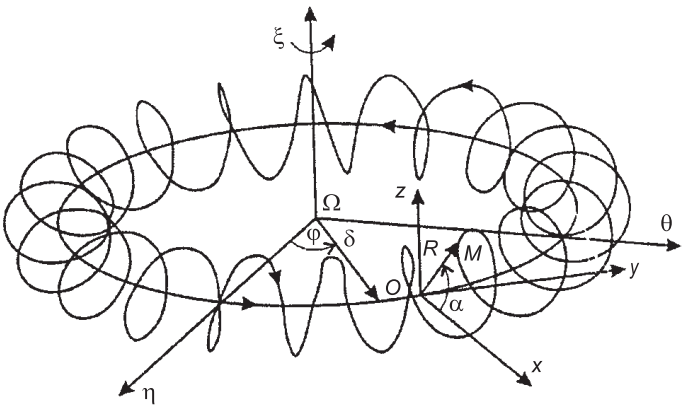



*Рис. 2*

рость сложного движения в текущий момент времени можно выразить через матричные преобразования. Действительно, обладая законом сложного движения в виде

$$\bar{\rho} = [\Psi]\bar{r} = [\varphi][\Delta][\alpha]\bar{r},$$

скорость точки $M$ относительно неподвижной системы координат можно найти путем дифференцирования радиуса-вектора $\bar{\rho}$ по времени:

$$\bar{\upsilon} = \frac{d\bar{\rho}}{dt} = \frac{d}{dt}([\Psi]\bar{r}) = \frac{d}{dt}([\varphi][\Delta][\alpha]\bar{r}). \qquad (2)$$

Так как матрица отдельного преобразования является функцией одного из двух параметров — либо угловой $(\varphi, \alpha)$, либо линейной координаты $(\delta)$ и в общем случае времени $t$, последнее выражение следует дифференцировать как сложную функцию

$$\bar{\upsilon} = \frac{d}{dt}([\varphi][\Delta][\alpha]\bar{r}) = \left\{\frac{d[\varphi]}{d\varphi}\frac{d\varphi}{dt}[\Delta][\alpha] + [\varphi]\frac{d[\Delta]}{d\delta}\frac{d\delta}{dt}[\alpha] + \right.$$
$$\left. + [\varphi][\Delta]\frac{d[\alpha]}{d\alpha}\frac{d\alpha}{dt}\right\}\bar{r}. \qquad (3)$$

Как известно, определение производной матрицы по параметру состоит в умножении самой матрицы на оператор дифференцирования [2], например,

$$\frac{d[\varphi]}{d\varphi} = [D_\xi][\varphi].$$

Операторами дифференцирования матриц преобразований при поворотах системы координат вокруг осей $\Omega\xi$ и $Oy$ служат матрицы

$$[D_\xi] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad [D_\theta] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

соответственно, а для матрицы преобразования переноса системы вдоль оси $Ox$ служит матрица

$$[D_x] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Сумма произведений, заключенная в скобках выражения (3), является матрицей

$$[V] = [D_\xi] \cdot [\varphi] \dot{\varphi} \cdot [\Delta] \cdot [\alpha] + [\varphi] \cdot [D_x] \cdot [\Delta] \dot{\delta} \cdot [\alpha] + [\varphi] \cdot [\Delta] \cdot [D_\theta] \cdot [\alpha] \dot{\alpha}. \quad (4)$$

Следовательно, скорость сложного движения точки $M$ можно представить в матричной форме

$$\bar{\upsilon} = [V]\bar{r}. \quad (5)$$

Матрица $[V]$ по аналогии с вектором угловой скорости вращающегося тела в формуле Эйлера ($\bar{\upsilon} = \bar{\omega} \times \bar{r}$) называется матрицей скорости сложного движения точки.

Вычислив произведение матриц в каждом из слагаемых формулы (4), нетрудно установить их структуру. В частности, первое слагаемое сводится к матрице

$$[P_1] = \begin{bmatrix} -\sin\varphi\cos\alpha & \cos\varphi & \sin\varphi\sin\alpha & -\delta\sin\varphi \\ \cos\varphi\cos\alpha & -\sin\varphi & -\cos\varphi\sin\alpha & \delta\cos\varphi \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

второе — к матрице

$$[P_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cos\varphi \\ 0 & 0 & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

и третье — к матрице

$$[P_3] = \begin{bmatrix} -\sin\alpha\cos\varphi & 0 & -\cos\alpha\cos\varphi & 0 \\ -\sin\alpha\sin\varphi & 0 & -\cos\alpha\sin\varphi & 0 \\ \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

После умножения матриц $[P_1]$, $[P_2]$, $[P_3]$ соответственно на $\dot{\varphi}$, $\dot{\delta} = 0$, $\dot{\alpha}$ и последующего сложения согласно (4) находят матрицу скорости

$$[V] = \begin{bmatrix} -\dot{\varphi}\sin\varphi\cos\alpha - \dot{\alpha}\sin\alpha\cos\varphi & \dot{\varphi}\cos\varphi & \dot{\varphi}\sin\varphi\sin\alpha - \dot{\alpha}\cos\alpha\cos\varphi & -\delta\dot{\varphi}\sin\varphi \\ \dot{\varphi}\cos\varphi\cos\alpha - \dot{\alpha}\sin\alpha\sin\varphi & -\dot{\varphi}\sin\varphi & -\dot{\varphi}\cos\varphi\sin\alpha - \dot{\alpha}\cos\alpha\sin\varphi & \delta\dot{\varphi}\cos\varphi \\ \dot{\alpha}\cos\alpha & 0 & -\dot{\alpha}\sin\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Вычислив произведение матрицы $[V]$ на радиус-вектор $\bar{r} = (R\cos\alpha_0,\ 0,\ R\sin\alpha_0,\ 1)$, легко установить проекции вектора скорости при сложном движении точки $M$:

$$\upsilon_\eta = -\dot{\varphi}\,[\delta + R\cos(\alpha + \alpha_0)]\sin\varphi - \dot{\alpha}\,R\sin(\alpha + \alpha_0)\cos\varphi,$$

$$\upsilon_\theta = \dot{\varphi}\,[\delta + R\cos(\alpha + \alpha_0)]\cos\varphi - \dot{\alpha}\,R\sin(\alpha + \alpha_0)\sin\varphi,$$

$$\upsilon_\xi = \dot{\alpha}\,R\cos(\alpha + \alpha_0).$$

Если обозначить сумму углов символом $\beta(t) = \alpha(t) + \alpha_0$ и считать величину $\beta(t)$ законом относительного движения точки, то полученные выражения для проекций абсолютной скорости совпадают с аналогичными формулами, если выводить их традиционным методом. Чтобы убедиться в этом, достаточно на рис. 3 показать векторы относительной и переносной скоростей, спроецировать их на оси неподвижной системы координат и в соответствии с теоремой о сложении скоростей суммировать соответствующие проекции.

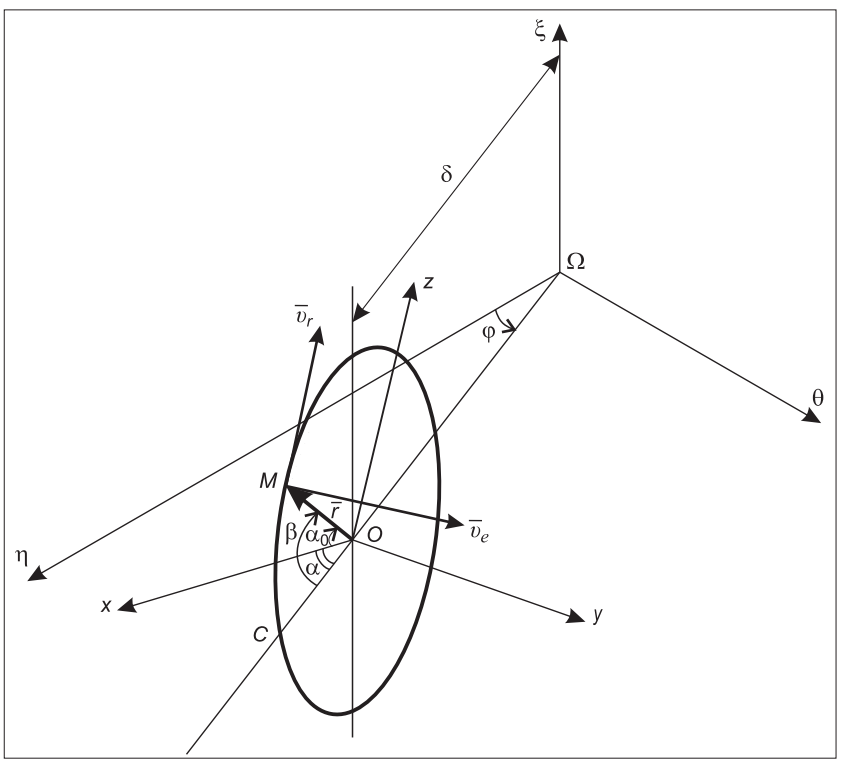



*Рис. 3*

Действительно, проецируя сначала вектор скорости относительного движения $\bar{\upsilon}_r$, расположенный в плоскости кольца и направленный перпендикулярно радиусу-вектору $\bar{r}$, на плоскость $\Omega\eta\theta$, находят

$$\upsilon_{r\eta\theta} = \dot{\beta}\,R\sin\beta.$$

Проекция скорости относительного движения на ось $\Omega\xi$ равна

$$\upsilon_{r\xi} = \dot{\beta}\,R\cos\beta.$$

Проекции скорости $\bar{\upsilon}_e$ переносного движения точки $M$ на оси неподвижной системы координат $\Omega\eta\theta\xi$ равны

$$\upsilon_{e\eta} = -\dot{\varphi}(\delta + R\cos\beta)\sin\varphi,$$
$$\upsilon_{e\theta} = \dot{\varphi}(\delta + R\cos\beta)\cos\varphi,$$
$$\upsilon_{e\xi} = 0.$$

Вычислив теперь проекции вектора $\bar{\upsilon}_{\eta\theta}$ на оси координат $\Omega\eta$ и $\Omega\theta$ и сложив их с соответствующими проекциями скорости переносного движения, можно определить проекции вектора скорости сложного движения точки $M$ в виде

$$\upsilon_\eta = -\dot{\varphi}(\delta + R\cos\beta)\sin\varphi - \dot{\beta}R\sin\beta\cos\varphi,$$
$$\upsilon_\theta = \dot{\varphi}(\delta + R\cos\beta)\cos\varphi - \dot{\beta}R\sin\beta\sin\varphi,$$
$$\upsilon_\xi = \dot{\beta}R\cos\beta.$$

Благодаря матричной форме решения задачи о сложном движении точки оказывается возможным не только компьютерный вывод закона сложного движения точки и автоматическое построение траектории движения, но и вычисление скорости согласно (5) с помощью ПЭВМ, что позволяет демонстрировать на экране монитора компьютерный фильм о сложном движении точки с одновременной фиксацией координат точки и значений скорости в текущий момент времени.

Предлагаемый способ решения задачи может быть использован в учебном процессе как при выполнении курсовых работ по теоретической механике по теме сложного движения точки [3], так и при определении скорости сложного движения в исследованиях по прикладной механике [4].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. Потапова, Т.Ю. Матричная форма закона сложного движения точки [Текст] / Т.Ю. Потапова, В.А. Монахов // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и исследователей. — Пенза : ПГУАС, 2010. — С. 135–142.
2. Механика промышленных роботов. Т. 1 / Под ред. К.В. Фролова [Текст]. — М. : Высш. шк., 1988. — 304 с.
3. Яблонский, А.А. Сборник заданий для курсовых работ по теоретической механике [Текст] / А.А. Яблонский. — М. : Интеграл-пресс, 2008. — 382 с.
4. Монахов, В.А. Уравновешивание тел вращения в вибрационном режиме [Текст] / В.А. Монахов, С.В. Бакушев // Изв. вузов. Строительство. — 2006. — № 2. — С. 89–94.



*МОНАХОВ Владимир Андреевич, д-р техн. наук, проф.*
*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*
*ПОТАПОВА Татьяна Юрьевна, студ.*
*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*



Получено после доработки 19.03.12



**Monakhov Vladimir Andreevich**, doctor of technical sciences, professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia
**Potapova Tatyana Yurievna**, student, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

## THE FORMING OF VELOCITY MATRIX IN A COMPLEX MOTION OF A POINT

The offered method determining the velocity of the complex motion of a material point is based on the use of a matrix form of the Complex motion Law. Procedure of the calculation of velocity includes differentiation according to time of matrix composition making the resulting matrix forming of coordinates. Authenticity of the new method is corroborated with the solution of a typical task of the complex motion of the point in the scalar kind.

K e y  w o r d s: coordinate, material point, complex motion of the point, law of the motion, matrix of velocity, matrix composition, differentiation of matrix.

REFERENCES

1. P o t a p o v a, T.Yu. Matrix form of the complex motion law of a point [Text] / T.Yu. Potapova, V.A. Monahkov // Materials Intern. Scientific and Technical Conf. of Young Scientists and Researchers. — Penza : PGUAS, 2010. — P. 135–142.
2. Industrial Robots Mechanics. V. 1 / Ed. by K.V. Frolov. — M. : Higher School, 1988. — 304 p.
3. J a b l o n s c y, A.A. Collection of Tasks for Course Papers on Theoretical Mechanics [Text] / A.A. Jablonscy. — M. : Integral Press, 2008. — 382 p.
4. M o n a k h o v, V.A. The equilibration of bodies of rotation in a vibrating mode [Text] / V.A. Monakhov, S.V. Bakushev // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2006. — N 2. — P. 89–94.

УДК 625.76.08 : 539.375.6

С.П. ОСИПОВ, А.В. НЕГОДИН, К.Б. БИДА, А.В. ПАРФЕНОВ

# УРАВНЕНИЯ ВЗАИМНОЙ СВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ ИЗНОСА КОНУСНЫХ ВРАЩАЮЩИХСЯ РЕЗЦОВ ДОРОЖНЫХ ФРЕЗ

Предложены уравнения взаимной связи линейных, площадных, массовых и объемных параметров износа конусных вращающихся резцов дорожных фрез. Проведена экспериментальная проверка полученных результатов.

Ключевые слова: конусные вращающиеся резцы, дорожные фрезы, абразивный износ, параметры износа.

Эффективность применения дорожных фрез зависит от своевременной замены резцов рабочих органов. Долговечность резцов связана с их формой, характеристиками разрабатываемой среды, материалом, геометрическими параметрами процесса резания и т.д. Основным физическим процессом, определяющим долговечность резцов, является абразивный износ. Указанный процесс характеризуется линейным, массовым, площадным, объемным параметрами износа [1, 2]. В последнее время появились приборы для оценки степени износа резцов машин для разработки прочных сред в процессе эксплуатации [3, 4]. Необходимость в информации о значении того или иного параметра износа определяется конкретной задачей, стоящей перед эксплуатационником, экономистом, ремонтником или исследователем. Имеются работы [1, 2], в которых анализируется влияние того или иного параметра износа на процесс резания. В работе [1] приведен один из возможных вариантов метода перерасчета массового коэффициента износа конусных вращающихся резцов в линейный коэффициент износа. Имеющихся в литературе данных недостаточно для построения уравнений, описывающих взаимную связь массовых, линейных, площадных и объемных параметров износа резцов рабочих органов дорожных фрез.

На рис. 1 приведена геометрическая схема резания асфальтобетона для наиболее типичного вида конусных резцов, применяемых в рабочих органах дорожных фрез. Вращение конусных резцов необходимо для обеспечения равномерности износа. Вращающиеся резцы серии W6 SG применяются для разработки особо прочных сред. В работе [2] рассмотрены особенности износа таких резцов, приведены выражения для оценки долговечности в режимах свободного вращения и блокирования вращения. Процесс износа в основном определяется износостойким наконечником резца *1*, который прочно впаян в стальной корпус *2*. Пусть наконечник резца имеет форму конуса высотой $l_0$ и половинным углом $\alpha$ при вершине конуса. Геометрическая схема резания прочной среды резцом характеризуется углом $\beta$ между линией резания и направляющей конуса. Значение угла $\beta$ всегда больше нуля ($\beta > 0$). Направление резания на рис. 1 указано стрелкой. Поверхность износа для вращающихся резцов представляет собой конусную поверхность с направляющей $O'B$ — конус износа.

Процесс износа резцов может быть охарактеризован параметрами износа: линейным $l$, площадным $S$, массовым $\Delta m$, объемным $\Delta V$. Для оцен-

© Осипов С.П., Негодин А.В., Бида К.Б., Парфенов А.В., 2012

ки взаимной связи различных параметров износа воспользуемся результатами работы [2].

**Линейный параметр износа** $l$ равен величине изменения длины резца в процессе износа относительно длины неизношенного резца. В работе [2] износ резца в процессе резания предлагается характеризовать параметром $h$, значение которого численно равно расстоянию между линией резания и параллельной ей линией, которая проходила бы через острие неизношенного резца. Величина $h$ может быть достаточно легко измерена в

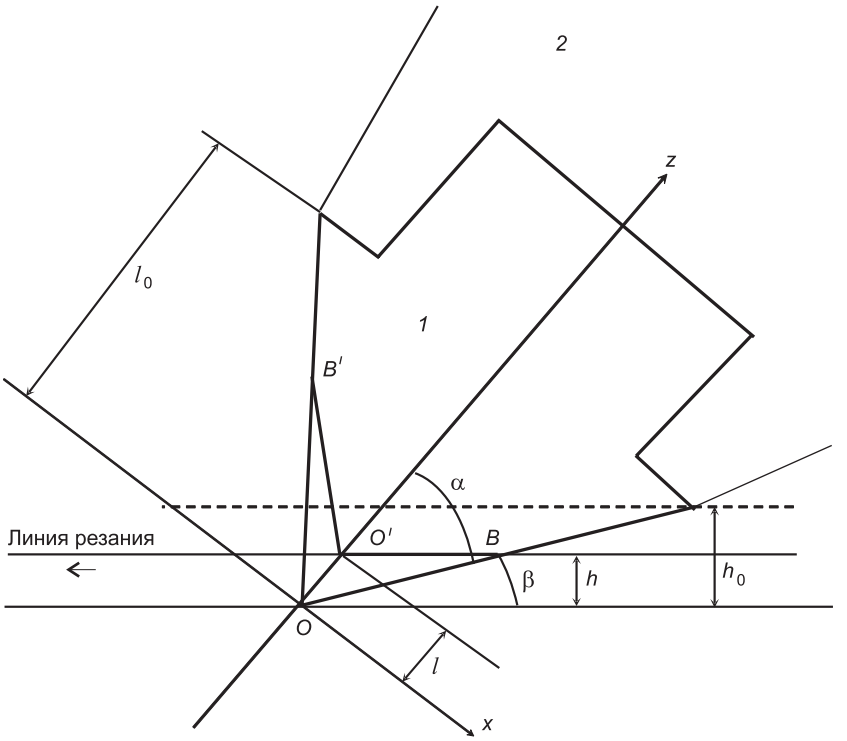



*Рис. 1.* Схема резания среды вращающимся конусным резцом

процессе эксплуатации. Из геометрических соображений (рис. 1) по значению этого параметра оценивается линейный параметр износа

$$l = \frac{h}{\sin(\alpha + \beta)}. \qquad (1)$$

**Площадной параметр износа** $S$ равен площади боковой поверхности конуса износа $B'O'B$ (рис. 1). С учетом формулы (1) соответствующее расчетное выражение, связывающее линейный параметр износа $l$ с площадью $S$, имеет вид, аналогичный выражению, приведенному в работе [2]:

$$S = \frac{\pi l^2 \sin(\alpha + \beta)\sin^2\alpha}{\sin^2\beta}. \qquad (2)$$

Формула для оценки значения линейного параметра износа исходя из значения площадного параметра износа $S$ легко выводится из выражения (2):

$$l = \frac{\sin\beta}{\sin\alpha}\sqrt{\frac{S}{\pi\sin(\alpha + \beta)}}. \qquad (3)$$

**Массовый параметр износа** $\Delta m$ конусного вращающегося резца равен разнице масс неизношенного резца $m_0$ и изношенного резца $m$ — $\Delta m = m_0 - m$. Допустим, что вне боковой поверхности конуса $B'O'B$ изно-

са не происходит. Это допущение разумно принять в случае выполнения двух основных условий:

1) толщина стружки $l_{стр}$, образующейся в процессе резания, существенно меньше предельного значения линейного параметра износа — $l_{стр} << l_0 = \dfrac{h_0}{\sin(\alpha + \beta)}$;

2) значения давлений на участках поверхности резца, отличных от поверхности износа, имеют существенно меньшие значения, чем для поверхности износа.

Очевидно, что первое условие выполняется, так как разрабатываемая среда прочная. Необходимо принять еще одно допущение, которое связано с материалом износостойкого наконечника, собственно конуса, — материал износостойкого наконечника однороден по всему его объему. Пусть $\rho$ — плотность материала износостойкого наконечника, тогда массовый параметр износа находится по формуле $\Delta m = \rho \Delta V$, где $\Delta V$ — разница объемов неизношенного и изношенного резцов. В нашем случае величина $\Delta V$ равна объему между двумя коническими поверхностями $B'OB$ и $B'O'B$ (рис. 1). Отсюда следует, что массовый параметр износа может быть оценен с помощью выражения

$$\Delta m = \frac{\pi \rho l^3 \sin^2(\alpha + \beta) \sin^2 \alpha}{3 \sin^2 \beta}. \qquad (4)$$

Формула для оценки линейного параметра износа $l$ исходя из известного массового параметра $\Delta m$ легко находится из выражения (4):

$$l = \sqrt[3]{\frac{3 \Delta m \sin^2 \beta}{\pi \rho \sin^2 \alpha \sin^2(\alpha + \beta)}}. \qquad (5)$$

После подстановки (3) в (4) получим формулу для вычисления массового параметра износа $\Delta m$ через площадной параметр износа $S$:

$$\Delta m = \frac{\rho \sin \beta}{3 \sin \alpha} \sqrt{\frac{\sin(\alpha + \beta) S^3}{\pi}}. \qquad (6)$$

Обратная к выражению (6) зависимость имеет вид

$$S = \sqrt[3]{\frac{9\pi (\Delta m)^2 \sin^2 \alpha}{\rho^2 \sin^2 \beta \sin(\alpha + \beta)}}. \qquad (7)$$

**Объемный параметр износа.** В предыдущем пункте уже было подчеркнуто, что оцениваемым параметром износа может быть и $\Delta V$ — разница объемов неизношенного резца и изношенного резца (объемный параметр износа). Объемный параметр износа $\Delta V$ связан с массовым параметром износа $\Delta m$ простейшим соотношением, указанным выше:

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho}. \qquad (8)$$

Для получения выражений, связывающих объемный параметр износа $\Delta V$ с другими параметрами, необходимо в зависимостях (4)–(7) учитывать соотношение (8).

Для удобства использования в таблицу сведены все формулы (2)–(8), позволяющие оценить взаимную связь параметров износа конусовидного вращающегося резца. На выражениях, приведенных в таблице, базируются алгоритмы расчета выбранного параметра износа исследуемых резцов по значению параметра, оцененного экспериментальным путем.

**Формулы взаимной связи параметров износа**

| | | Оцениваемые параметры | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $l$ | $S$ | $\Delta m$ | $\Delta V$ |
| Заданные параметры | $l$ | — | $\dfrac{\pi l^2 \sin(\alpha+\beta)\sin^2\alpha}{\sin^2\beta}$ | $\dfrac{\pi\rho l^3 \sin^2(\alpha+\beta)\sin^2\alpha}{3\sin^2\beta}$ | $\dfrac{\pi l^3 \sin^2(\alpha+\beta)\sin^2\alpha}{3\sin^2\beta}$ |
| | $S$ | $\dfrac{\sin\beta}{\sin\alpha}\sqrt{\dfrac{S}{\pi\sin(\alpha+\beta)}}$ | — | $\dfrac{\rho\sin\beta}{3\sin\alpha}\sqrt{\dfrac{\sin(\alpha+\beta)S^3}{\pi}}$ | $\dfrac{\sin\beta}{3\sin\alpha}\sqrt{\dfrac{\sin(\alpha+\beta)S^3}{\pi}}$ |
| | $\Delta m$ | $\sqrt[3]{\dfrac{3\Delta m\sin^2\beta}{\pi\rho\sin^2\alpha\sin^2(\alpha+\beta)}}$ | $\sqrt[3]{\dfrac{9\pi(\Delta m)^2\sin^2\alpha}{\sin^2\beta\sin(\alpha+\beta)}}$ | — | $\dfrac{\Delta m}{\rho}$ |
| | $\Delta V$ | $\sqrt[3]{\dfrac{3\Delta V\sin^2\beta}{\pi\sin^2\alpha\sin^2(\alpha+\beta)}}$ | $\sqrt[3]{\dfrac{9\pi(\Delta V)^2\sin^2\alpha}{\sin^2\beta\sin(\alpha+\beta)}}$ | $\rho\Delta V$ | — |

Для проверки формул связи, указанных в таблице, проведена серия экспериментальных работ по оценке линейных, площадных, массовых параметров износа конусовидных резцов W6 SG, использованных при резании реконструируемого дорожного полотна. Исследована партия из 80 резцов, изношенных в различной степени. Часть из них (26 штук) была отбракована, так как эти резцы функционировали в режиме блокирования вращения, т.е. наблюдалась плоская эллиптическая поверхность износа.

На рис. 2, 3 приведены результаты сопоставления теоретических зависимостей площадного и массового параметров износа от линейного параметра износа с результатами экспериментальных исследований. Линейные измерения (длина резца, высота и диаметр конуса износа) проводили электронным штангенциркулем ШЦ-I-1-125-0,01. Изношенные резцы взвешивали на лабораторных весах CAS MW-300T, точность измерения 0,01 г. Максимальное значение относительного отклонения экспериментальных и аналитических зависимостей не превысило 10 %, что подтверждает возможность использования формул из таблицы для оценки взаимной связи различных параметров износа.

Предложенные в работе уравнения позволяют по известным значениям параметров износа конусных вращающихся резцов оценить другие параметры износа. Полученные результаты могут быть использованы в системах контроля технического состояния конусных вращающихся резцов дорожных фрез, что позволит повысить их надежность за счет рационального подбора резцов и своевременной их замены. Уравнения для оценки параметров износа легко адаптируются для других форм вращающихся резцов.

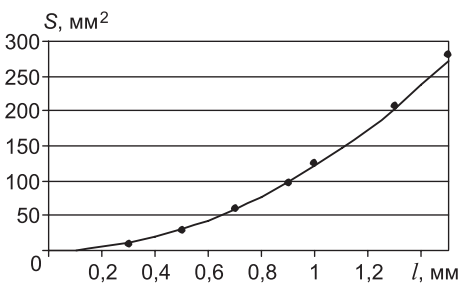



*Рис. 2.* Зависимость площадного параметра износа $S$ от линейного параметра износа $l$

— расчет по формуле (2); • экспериментальные данные

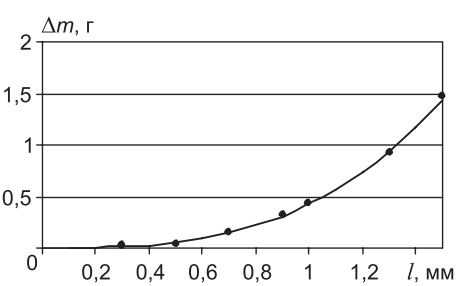



*Рис. 3.* Зависимость массового параметра износа $\Delta m$ от линейного параметра износа $l$

— расчет по формуле (4); • экспериментальные данные

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов, С.Н. Исследование влияния внешних условий изнашивания на износостойкость резцов дорожной фрезы [Текст] / С.Н. Попов, Д.А. Антонюк // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. — 2008. — № 1. — С. 25–29.
2. Кириллов, Ф.Ф. Особенности износа конусовидных резцов [Текст] / Ф.Ф. Кириллов, С.П. Осипов, К.Б. Бида, А.Д. Кухаренко // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 5. — С. 63–68.
3. Талеров, М.П. Возможный способ диагностирования резцов проходческих и очистных комбайнов [Текст] / М.П. Талеров // Зап. Горного ин-та. — 2009. — Т. 182. — С. 122–124.
4. Мазеин, С.В. Опыт внедрения системы контроля режущего инструмента ротора на ТПМК «Херренкнехт» [Текст] / С.В. Мазеин, С.М. Песков // Горный информ.-аналит. бюл. — 2005. — № 9. — С. 58–63.

*ОСИПОВ Сергей Павлович, канд. техн. наук; E-mail: osip1809@rambler.ru*
*Томский государственный архитектурно-строительный университет*
*НЕГОДИН Александр Викторович, ассист.*
*Томский государственный архитектурно-строительный университет*
*БИДА Константин Богданович, ассист.*
*Томский государственный архитектурно-строительный университет*
*ПАРФЕНОВ Александр Витальевич, студ.*
*Томский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 05.03.12

**Osipov Sergey Pavlovich**, candidate of technical sciences, E-mail: osip1809@rambler.ru, Tomsk State University of Architecture and Building, Russia
**Negodin Alexandr Victorovich**, assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, Russia
**Bida Konstantin Bogdanovich**, assistant, Tomsk State University of Architecture and Building, Russia
**Parfenov Alexandr Vitalyevich**, student, Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

## THE EQUATIONS OF THE INTERCONNECTION OF PARAMETERS OF DETERIORATION CONICAL OF ROTATING CUTTERS OF ROAD MILLS

The equations of an interconnection of linear, area, mass and volumetric parameters of wear conical rotating cutters of road mills are offered. Experimental check of the received results were made.

Key words: conical rotating cutters, road mills, abrasive wear, wear parameters.

REFERENCES

1. Popov, S.N. Investigation of the influence of external conditions on the wear process of the road milling cutters [Text] / S.N. Popov, D.A. Antonyuk // New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering. — 2008. — N 1. — P. 25–29.
2. Kirillov, F.F. Features wear cone-shaped cutters [Text] / F.F. Kirillov, S.P. Osipov, K.B. Bida, A.D. Kucharenko // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 5. — P. 63–68.
3. Talerov, M.P. Possible diagnosis of cutters and shearers heading [Text] / M.P. Talerov // Notes of the Mining Institute. — 2009. — T. 182. — P. 122–124.
4. Mazein, S.V. Experience of introduction a control system on the cutter rotor TBM «Herrenknecht» [Text] / S.V. Mazein, S.M. Peskov // Mining Informational and Analytical Bulletin. — 2005. — N 9. — P. 58–63.

УДК 624.012.4.001

А.Т. ПИМЕНОВ, О.А. ИГНАТОВА, А.А. ПОПКОВ, В.В. ФОМЕНКО

# УСЛОВИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОНОЛИТНОСТИ СИСТЕМ, ОБРАЗОВАННЫХ ОСНОВАНИЕМ И ПОКРЫВАЮЩИМ СЛОЕМ

Рассмотрены возможные варианты слоистых систем, образующихся при нанесении на основание покрывающих слоев различного назначения. Предложены математические модели, позволяющие прогнозировать монолитность таких систем.

Ключевые слова: слоистая система, монолитность слоев, математическая модель.

При новом строительстве, ремонте зданий и сооружений, требующих нанесения на стены, потолки и другие ограждающие конструкции слоев материала с заданными свойствами, возникает проблема обеспечения монолитности основания и покрывающего слоя.

Качество таких систем, как штукатурные, кровельные, теплоизоляционные, торкет-системы, наливные полы и др., зависит не только от материала и тщательности выполнения работ, но и от последующих усадочных деформаций покрывающего слоя, которые могут привести к интенсивному трещинообразованию, формированию так называемых раздельно-блочных систем и нарушению их целостности. Чтобы обеспечить монолитность всей системы в целом предлагается рассматривать совместную работу основания и покрывающего слоя.

Раздельно-блочные системы поддаются математическому описанию и экспериментальному изучению. В зависимости от сочетания прочностных и деформативных характеристик материала слоя и материала покрытия, от их адгезионных и когезионных свойств можно выделить четыре варианта слоистых систем.

1. Упругая система образуется в случае, когда произведение модуля упругости на относительную деформацию слоя больше, чем у материала покрытия, или равно ему. Сцепление слоя с покрытием $f_{\text{сл п}}$ равно сопротивлению сдвига.

2. Жесткопластическая система образуется, если произведение модуля упругости на относительную деформацию слоя больше, чем у материала покрытия, или равно ему. Сцепление слоя с покрытием меньше сопротивления сдвига материала покрытия.

3. Упругопластическая система возникает в случае, когда произведение модуля упругости на относительную деформацию слоя меньше, чем у материала покрытия, при сцеплении слоя с покрытием, равном сопротивлению сдвига материала покрытия.

4. Упруговязкопластическая система возникает в случае, когда произведение модуля упругости на относительную деформацию слоя меньше, чем у материала покрытия, и сцепление слоя с покрытием меньше сопротивления сдвига материала покрытия.

Рассмотренные системы могут быть представлены соответствующими математическими моделями. Образующаяся в первом случае монолитная слоистая система, описываемая упругой моделью, по свойствам не отличается от монолитной однородной системы и достаточно полно опи-

© Пименов А.Т., Игнатова О.А., Попков А.А., Фоменко В.В., 2012

сана в литературе. Образующаяся во втором случае слоистая система может быть описана жесткопластической моделью. Она позволяет изучать способность слоистой системы к пластическим деформациям, величина которых существенно превышает упругие деформации. Такую систему можно представить в виде слоев, испытывающих трение. Механизм пластической деформации связан со сдвигом материала по некоторым площадкам и отвечает условию скольжения (условие Кулона–Мора).

$$\tau = k + \sigma_{\text{п}} \operatorname{tg}\varphi, \tag{1}$$

где $k$ — сцепление (сопротивление сдвигу, не зависящее от величины нормального давления);

$\sigma_{\text{п}}$ — нормальные напряжения на площадке скольжения;

$\varphi$ — угол внутреннего трения.

Образование такой слоистой системы может оказаться нежелательным в том случае, если коэффициент трения слоя о покрытие меньше коэффициента внутреннего трения материала покрытия, поскольку возможно образование двух поверхностей скольжения вместо одной. В обоих случаях нарушение монолитности системы, работающей по жесткопластической модели, будет происходить по адгезионному механизму (разрушение по поверхности сцепления). Слоистая упругопластическая система отличается от жесткопластической наличием упругих деформаций. До некоторого предела, определяемого условием предельного состояния, в системе развиваются только упругие деформации, а по достижении указанного предела — пластические.

В условиях объемно-напряженного состояния системы предельная объемная деформация $\varepsilon_{\text{v}}^{\text{пр}}$ может быть определена следующим образом:

$$\varepsilon_{\text{v}}^{\text{пр}} = \frac{3(1-2\mu)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)}{E}. \tag{2}$$

Учитывая, что $\dfrac{3(1-2\mu)}{E} = \dfrac{1}{E_{\text{v}}}$,

$$\varepsilon_{\text{v}}^{\text{пр}} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{E_{\text{v}}} = \frac{\sigma_x}{E_{\text{v}}} + \frac{\sigma_y}{E_{\text{v}}} + \frac{\sigma_z}{E_{\text{v}}} \tag{3}$$

или

$$\varepsilon_{\text{v}}^{\text{пр}} = \varepsilon_x^{\text{пр}} + \varepsilon_y^{\text{пр}} + \varepsilon_z^{\text{пр}}. \tag{4}$$

В случае преобладания напряжений по какой-либо из осей из суммы (4) можно выделить $\varepsilon_{\text{раст}}^{\text{пр}}$ — предельную растяжимость и $\varepsilon_{\text{сж}}^{\text{пр}}$ — предельную сжимаемость. Метод определения предельной растяжимости, наиболее важной для материала слоя, изложен в работах [1, 2].

По нашему мнению, для более точного описания упругопластического деформирования слоев целесообразно в математическую модель ввести предельную объемную деформацию, что позволит полнее описать также упругопластическую неоднородную систему.

Раздельно-блочная система может быть преобразована в слоистые системы, описываемые упругой, жесткопластической, упругопластической или упруговязкопластической моделями.

Система, описываемая упругой моделью, сохранит монолитность в том случае, если объемная деформация системы меньше предельной объемной деформации.

Система, описываемая жесткопластической моделью, в зависимости от соотношения коэффициента трения слоя по покрытию и коэффициен-

та внутреннего трения материала покрытия сохранит монолитность, если будут соблюдены следующие условия:

— при коэффициенте трения слоя по покрытию, значительно меньшем коэффициента внутреннего трения материала покрытия, велика вероятность образования двух поверхностей скольжения на контакте нанесенного раствора с материалом покрытия. Однако условие монолитности (1) останется прежним;

— если коэффициент трения слоя по покрытию приближается к коэффициенту внутреннего трения материала покрытия, имеем условие монолитности

$$\tau < k_{\text{сл п}} + \sigma_{\text{п}} \text{tg}\varphi_{\text{сл п}}. \quad (5)$$

Система, описываемая упругопластической моделью, сохранит монолитность, пока объемная деформация материала не превысит предельную объемную деформацию (система работает по упругой модели).

В случае ее превышения монолитность продолжает сохраняться при условии

$$\tau < k_{\text{сл}} + \sigma_{\text{п}} \text{tg}\varphi_{\text{сл}}. \quad (6)$$

Система, описываемая упруговязкопластической моделью, сохранит монолитность, если приложенные к ней нормальные напряжения равны возникающим при этом касательным напряжениям, а объемная деформация системы не превышает ее предельного значения.

На основании разработанных моделей, описывающих взаимодействие слоев, образованных основанием и покрывающим слоем, предложен комплекс мер по уменьшению трещинообразования на начальном этапе твердения растворов для полов, что обеспечивает низкий уровень окончательной усадки готовой стяжки [3].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. А. с. 670887. СССР. Способ определения предельной растяжимости строительного материала [Текст] / А.Т. Пименов, В.П. Михайловский. — Опубл. 1979. — Бюл. № 24. — 3 с.
2. А. с. 898325. СССР. Устройство для определения физико-механических характеристик строительных материалов [Текст] / А.Т. Пименов, В.Г. Бойченко, А.Т. Ковалев. — Опубл. 1982. — Бюл. № 2. — 3 с.
3. Пименов, А.Т. Снижение усадки стяжек для полов [Текст] / А.Т. Пименов, О.А. Игнатова, В.В. Фоменко, А.А. Попков // VII Междунар. научна практична конф. «Найновите постижения на европейската наука-11». — Т. 39. Здание и архитектура. — София: Бял ГРАД-БГ ООД, 2011. — С. 70–73.



*ПИМЕНОВ Александр Трофимович, д-р техн. наук, проф.*
*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*
*ИГНАТОВА Ольга Арнольдовна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: oa_ignatova@mai.ru*
*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*
*ПОПКОВ Алексей Алексеевич, асп.*
*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*
*ФОМЕНКО Владимир Владимирович, магистрант; E-mail: VVFoma@rambler.ru*
*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*



Получено 06.03.12



**Pimenov Alexander Trofimovich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Ignatova Olga Arnoldovna**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: oa_ignatova@mai.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
**Popkov Alexey Alekseevich**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
**Fomenko Vladimir Vladimirovich**, undergraduate; E-mail: VVFoma@rambler.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## CONDITIONS FOR MAINTENANCE OF SOLIDITY OF SYSTEMS, FORMED BY THE BASIS AND COVERING LAYER

Possible variants of the layered systems formed at drawing on wasps-novanie of covering layers of different function are considered. The mathematical models, allowing to predict solidity of such systems are offered.

K e y w o r d s: layered system, solidity of layers, mathematical model.

REFERENCES

1. A.s. 670887. USSR. A Way of Definition of a Limiting Extensibility Building a Floor-material [Text] / A.T. Pimenov, V.P. Mihajlovsky. — Publ. 1979. — Bull. N 24. — 3 p.
2. A.s. 898325. USSR. Device for Definition of Physicomechanical Characteristics of Building Materials [Text] / A.T. Pimenov, V.G. Bojchenko, A.T. Kovalev. — Publ. 1982. — Bull. N 2. — 3 p.
3. P i m e n o v, A.T. Decrease of contraction coupler for floors [Text] / A.T. Pimenov, O.A. Ignatova, V.V. Fomenko, A.A. Popkov // Proc. VII Intern. Sciences Conf. Modern Achiement of European Science. — V. 39. Building and Architecture. — Sofia : Bjal GRAD-BG OOD, 2011. — P. 70–73.

УДК 624.074.2.014.2

И.С. ХОЛОПОВ, В.И. ТУР, А.В. ТУР

# ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВОГО СОЕДИНЕНИЯ СЕТЧАТОГО КУПОЛА

Приводится описание конструкции и численное исследование узлового соединения сетчатого купола. Описывается напряженно-деформированное состояние узла при работе в упругой и упругопластической стадии. Рассматриваются варианты усиления различными подкрепляющими элементами.

Ключевые слова: узловое соединение, конечно-элементное моделирование, автоматизированный расчет, расчетная схема, напряженно-деформированное состояние.

Одним из путей повышения технико-экономических показателей купольных конструкций является применение в них легких стальных и алюминиевых тонкостенных профилей [1]. ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова были разработаны «Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу конструкций каркаса малоэтажных зданий и мансард из холодногнутых стальных оцинкованных профилей производства ООО «Балт-Профиль» [2]. В этом документе предлагается методика расчета, учитывающая специфику работы тонкостенных профилей под нагрузкой.

Так, например, специалистами ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко было разработано узловое соединение стержневых элементов сетчатого купола в виде цилиндра с центральным патрубком и приваренными к нему ребрами [3], с таким узловым соединением в 2007 г. был возведен купол пролетом 50,7 м. В то же время работа узловых соединений конструкций, возведенных с применением тонкостенных профилей, изучена недостаточно полно и их исследование является актуальной задачей.

В 2011 г. в Самарском государственном архитектурно-строительном и Ульяновском государственном техническом университетах разработано узловое соединение, обеспечивающее соединение стержневых элементов купола при различных взаимных углах ориентации и не требующее применения сварки и индивидуального изготовления узловых соединений. Основной элемент узлового соединения выполняется в виде полого цилиндра (рис. 1). Радиус кривизны и высота цилиндра определяются из условий взаимной стыковки необходимого числа стержневых элементов.

Крепление стержневых элементов к цилиндру осуществляется при помощи уголков с одной развальцованной полкой. Радиус отгиба полки уголка равен радиусу кривизны цилиндра. Высота уголков подбирается таким образом, чтобы после сборки узлового соединения они не выступали над полкой стержневых элементов. На уголки наносится разметка под крепеж, прямой полкой они крепятся к стенкам стержневых элементов, а развальцованной примыкают к цилиндру и закрепляются способом, показанным на рис. 1. Размеры полок подбираются исходя из условий установки крепежных элементов по СНиП II-23–81* [4].

© Холопов И.С., Тур В.И., Тур А.В., 2012

В ходе исследования узлового соединения ставились задачи нахождения напряжений и перемещений в цилиндрическом элементе, определения оптимального решения узлового соединения (толщина цилиндра, размеры и количество подкрепляющих элементов) при заданных усилиях в стержнях и геометрических параметрах цилиндра (диаметр и высота цилиндра).

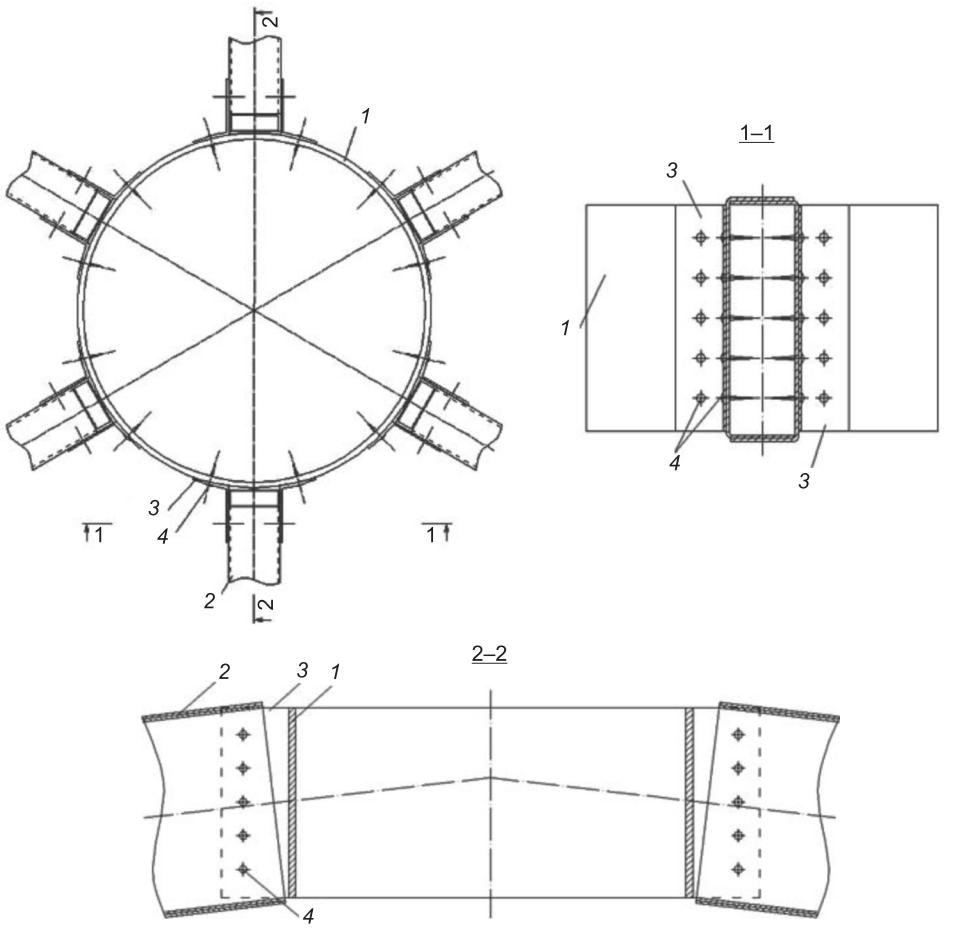



*Рис. 1.* Узловое соединение стержней сетчатого металлического купола
*1* — стальной цилиндр; *2* — стержневые элементы; *3* — развальцованные уголки; *4* — крепежные элементы

Для решения поставленной задачи применялось конечно-элементное моделирование с использованием вычислительного комплекса NX Nastran с препроцессором Femap 10.1.1. Конечно-элементная расчетная модель формировалась в виде так называемой пространственной фермы Мизеса и представляла собой фрагмент купола с одним центральным шарнирным узлом и стержнями реальной длины с шарнирными закреплениями. Отличие исследуемой расчетной модели от традиционной пространственной фермы Мизеса состоит в том, что центральный узел представляет собой конечно-элементную модель реального узла купола, состоящего из стального цилиндра и развальцованных уголков. Для моделирования использовались преимущественно четырехузловые пластинчатые конечные элементы.

Наружный диаметр цилиндра принят 300 мм, высота 141 мм, толщина 4 мм, материал — сталь С235 с нормативным сопротивлением $R_{уп}$ = = 235 МПа. Физическая нелинейность работы материала моделирова-

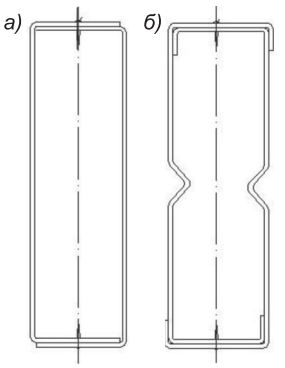



*Рис. 2.* Возможные поперечные сечения составных стержней

*а* — холодногнутый профиль без ребер жесткости, *б* — с ребрами жесткости

лась заданием реальной зависимости напряжений от деформаций. Допускалось, что при напряжениях менее 235 МПа материал работает полностью упруго, площадка текучести в функции напряжений от деформаций располагалась на уровне 245 МПа, максимально возможные напряжения в материале 380 МПа. Габариты цилиндра определялись из возможности стыковки шести стержней из сдвоенного П-образного профиля ПП150 по ТУ 1122-004-25386609–2004[1] (рис. 2).

Угол наклона стержневых элементов к плоскости торца цилиндра 7°. Нагрузка прикладывалась ступенчато, с шагом в 50 Н в каждый узел, находящийся на верхней кромке цилиндра (всего 96 узлов на верхней кромке, таким образом шаг нагрузки 4,8 кН) и действовала вертикально вниз, расчет проводился с учетом геометрической нелинейности. Общий вид конечно-элементной модели приведен на рис. 3.

Отдельно стоит отметить моделирование передачи усилия со стержня на цилиндр — в модель было введено допущение, что нагрузки от стержней к уголкам и от уголков к цилиндру передаются только через крепеж,

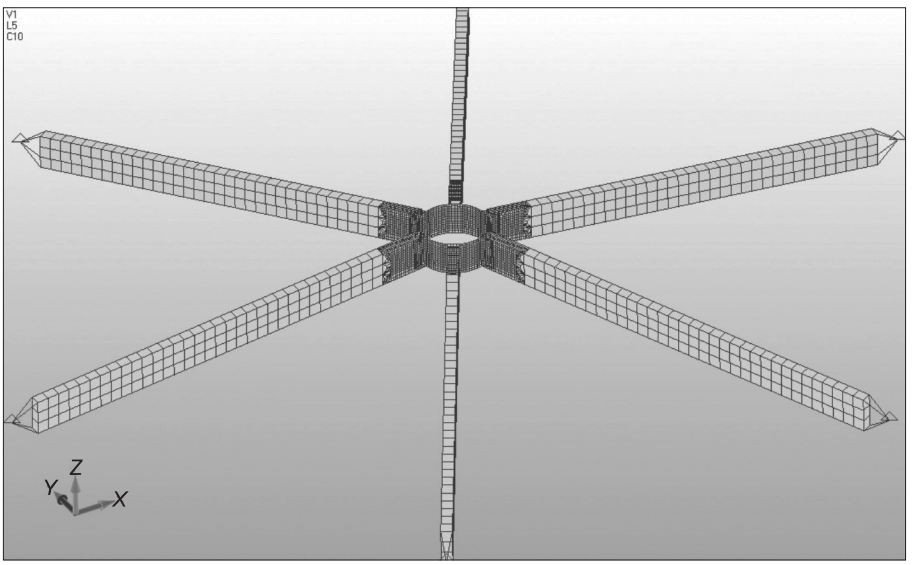



*Рис. 3.* Общий вид конечно-элементной модели узлового соединения

который считаем абсолютно жестким, поэтому в точках крепежа узлы соединяемых элементов «слиты». На рис. 4 показаны развальцованные уголки узлового соединения. Стержни и цилиндр условно не показаны для лучшей видимости уголков. На уголках отмечены узлы конечных элементов, в которых осуществляется крепление уголков к стержням и цилиндру. Отмеченные узлы являются общими для прямых полок уголков и стержней и развальцованных полок уголков и цилиндра соответственно.

Оценка предела несущей способности узлового соединения выполнялась при появлении одного из трех основных состояний:

[1] ТУ 1122-004-25386609–2004. Термопрофили гнутые оцинкованные для строительных конструкций.

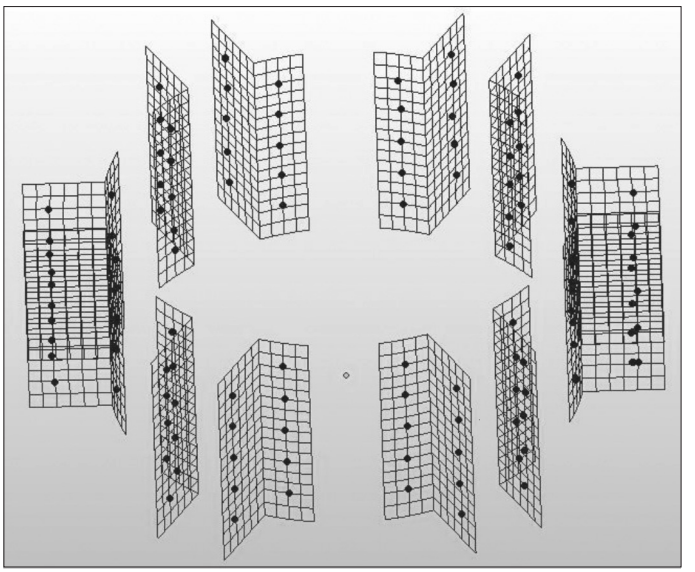


*Рис. 4.* Уголки с отметкой узлов для «слития» с соединяемыми элементами

1) превышение эквивалентными напряжениями по Губеру–Мизесу ($\sigma_{экв}$) предела текучести материала в одном или нескольких фрагментах узла;

2) возникновение значительных деформаций стенки цилиндрического элемента, превышающих ее толщину;

3) возникновение значительных перемещений центрального узла вниз, не позволяющих дальнейшее приложение нагрузки (возникновение так называемых эффектов «прощелкивания» или «продавливания»).

При приложении нагрузки по верхнему торцу цилиндра узловое соединение получало прогиб вниз. График прогиба приведен на рис. 5.

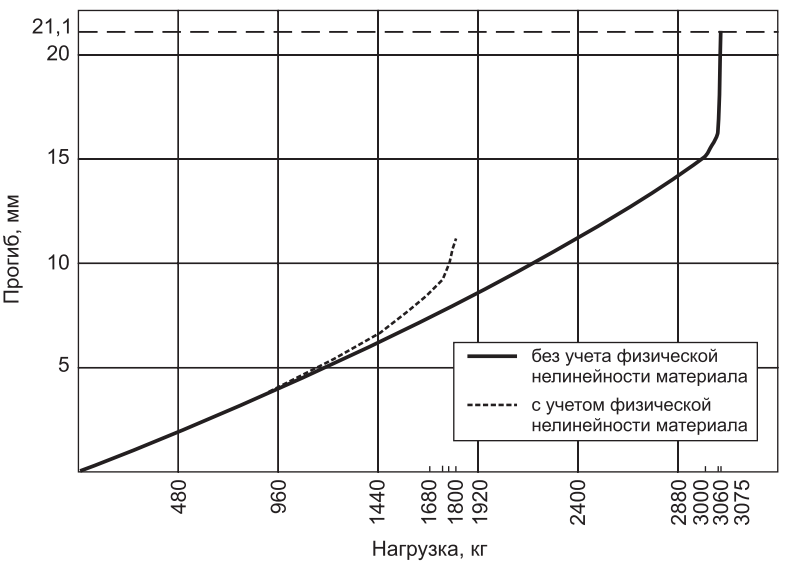



*Рис. 5.* Прогиб узлового соединения под нагрузкой

Максимальные эквивалентные напряжения развиваются в цилиндрическом элементе узлового соединения. При этом зоны высоких напряжений концентрируются в следующих локальных областях:

— в местах установки крепежных элементов, соединяющих цилиндр и развальцованные уголки;

— на наиболее удаленных от стержней участках цилиндра.

Возникновение первой группы зон высоких напряжений объясняется тем, что крепеж играет роль концентратора напряжений. Возникновение второй группы — тем, что стенка цилиндра между стержнями испытывает изгиб и в этом месте развиваются максимальные напряжения.

Также следует отметить, что зоны высоких напряжений расположены не равномерно по высоте цилиндра, а смещены к верхнему краю, что может быть объяснено близостью к месту приложения нагрузки.

На рис. 6, *а* приведено качественное распределение эквивалентных напряжений в цилиндрическом элементе при упругой работе материала. При превышении эквивалентными напряжениями предела текучести

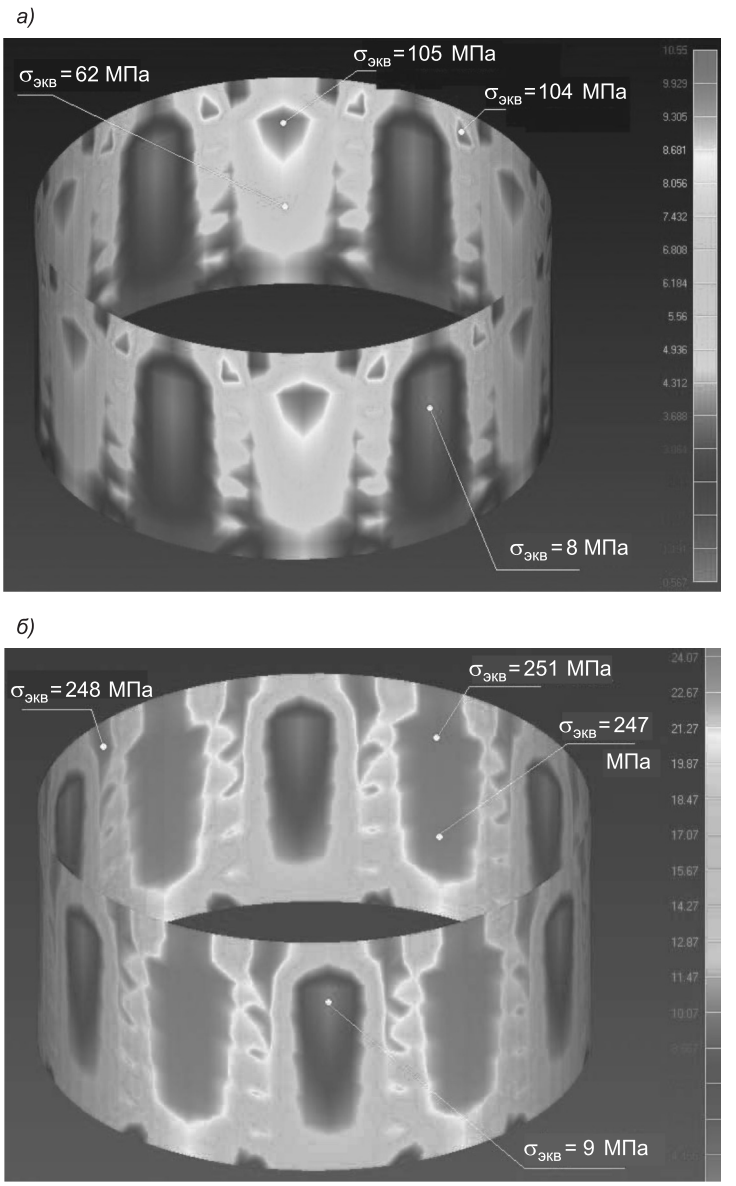



*Рис. 6*. Эквивалентные напряжения в цилиндре при упругой (*а*) и упругопластической (*б*) работе материала

материала напряженно-деформированное состояние узла несколько меняется и площадь зон высоких напряжений значительно увеличивается (рис. 6, *б*).

Анализируя напряженно-деформированное состояние узлового соединения (при заданных параметрах модели), можно сделать вывод, что появление значительных пластических деформаций стенки цилиндра в местах изгиба наступает задолго до того, как происходят значительные перемещения (что можно рассматривать как потерю устойчивости) стенки цилиндра и прощелкивание узлового соединения в целом.

Проведенное численное моделирование данного варианта узлового соединения показало, что для придания узлу достаточной жесткости необходимо увеличение толщины цилиндрического элемента или введение подкрепляющих элементов. Для снижения напряжений в стенке цилиндра были разработаны варианты подкрепления стенки цилиндра ребрами жесткости, так как увеличение толщины стенок цилиндра приводит к большей массе узла.

Рассматривалось несколько вариантов установки подкрепляющих элементов (рис. 7). Численное исследование показало, что наиболее выгодным вариантом установки подкрепляющих элементов является размещение двух кольцевых ребер жесткости по торцам цилиндра. В таблице приведены сравнительные результаты расчета для узла без подкреплений и узла с кольцевыми ребрами жесткости при одинаковых условиях нагружения.

Можно отметить, что установка ребер жесткости по торцам цилиндра значительно изменила напряженно-деформированное состояние узлового соединения. Эквивалентные напряжения в стенке цилиндра, вызванные изгибом, сократились на 35–40 %, деформации стенки цилиндра —

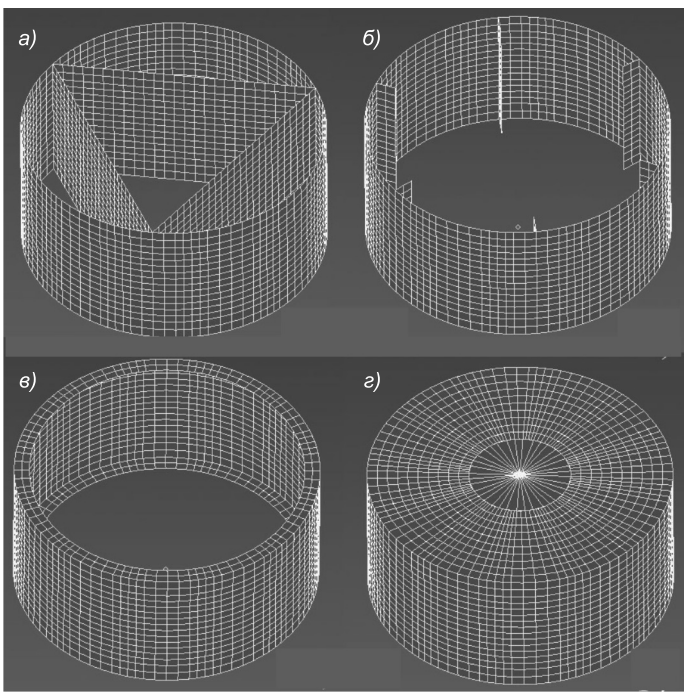



*Рис. 7*. Расчетные конечно-элементные схемы усиленного узлового элемента при установке:
трех диафрагм жесткости (*а*); вертикальных ребер жесткости (*б*); кольцевых ребер жесткости (*в*); сплошных диафрагм жесткости по торцам цилиндра (*г*)

**Сравнительные результаты моделирования узловых соединений**

| Показатель | Узловое соединение | |
|---|---|---|
| | без подкреплений | с двумя кольцевыми ребрами |
| $\sigma_{экв}$ в стенке цилиндра при нагрузке 9,6 кН, МПа | 219,4 | 142,8 |
| Прогиб узла при нагрузке 9,6 кН, мм | 4,03 | 3,46 |
| Деформация стенки цилиндра при нагрузке 9,6 кН, мм | 0,499 | 0,353 |
| Нагрузка, при которой происходит прощелкивание узла, кН | 18 | 23,85 |
| Нагрузка, при которой появляются пластические деформации в цилиндре, кН | 12,58 | 18,72 |
| Масса узла, кг | 9,557 | 10,66 |

на 30 %, прощелкивание узла наступает при нагрузке на 35 % выше, чем для узла без подкрепляющих элементов.

Для выявления влияния параметров подкрепляющих элементов на массу узлового соединения был поставлен полный двухфакторный численный эксперимент на двух уровнях. В качестве исследуемого параметра принималась теоретическая масса узлового соединения, необходимая для восприятия заданной нагрузки, в качестве факторов — ширина и толщина кольцевых ребер жесткости.

Была выявлена значимость влияния исследуемых факторов на теоретическую массу узлового соединения. Снижение массы узлового соединения достигается при увеличении ширины подкрепляющих ребер жесткости. Увеличение же их толщины не ведет к уменьшению массы узлового соединения. Можно рекомендовать применять ребра жесткости значительной ширины при минимально возможной, обеспечивающей устойчивость толщине ребра. Следует также отметить, что применение ребер жесткости шириной свыше величины 1/8–1/6 радиуса цилиндра также не приводит к уменьшению массы узлового соединения вследствие неполного использования материала в наиболее удаленной части ребра. Анализируя результаты эксперимента, можно сделать вывод, что установка кольцевых ребер жесткости рациональных параметров позволяет получить выигрыш в теоретической массе узлового соединения до 10 %.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. Савельев, В.А. Прочность и устойчивость металлических сетчатых большепролетных куполов : дис. ... канд. техн. наук [Текст] / В.А. Савельев. — М., 1966. — 191 с.
2. Айрумян, Э.Л. Рекомендации по проектированию, изготовлению и монтажу конструкций каркаса малоэтажных зданий и мансард из холодногнутых стальных оцинкованных профилей производства ООО «Балт-Профиль» [Текст] / Э.Л. Айрумян. — М. : ЦНИИПСК им. Мельникова, 2004. — 70 с.
3. Ведяков, И.И. Исследование работы узлов пространственной конструкции сетчатого купола [Текст] / И.И. Ведяков, М.Р. Урицкий, М.И. Фарфель и др. // Строит. механика и расчет сооружений. — 2007. — № 3. — С. 63–69.
4. СНиП II-23–81*. Стальные конструкции [Текст].



*ХОЛОПОВ Игорь Серафимович, д-р техн. наук, проф.*
*Самарский государственный архитектурно-строительный университет*
*ТУР Виталий Иванович, канд. техн. наук, проф.*
*Ульяновский государственный технический университет*

*ТУР Алексей Витальевич, асп.*
*Самарский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено после доработки 02.03.12

**Kholopov Igor Serafimovich**, doctor of technical sciences, professor, Samara State Architectural and Building University, Russia
**Tur Vitaly Ivanovich**, candidate of technical sciences, professor, Ulyanovsk State Technical University, Russia
**Tur Alexey Vitaljevich**, post-graduate student, Samara State Architectural and Building University, Russia

## INVESTIGATION OF STRESS-STRAIN STATE NODAL CONNECTION FOR THE MESH DOME

Describe the design and analysis the nodal connection of mesh dome. Describes the stress-strain state of a node when working in the elastic and elastic-plastic stage. Considers options for strengthening the various supporting elements.

K e y w o r d s: nodal connection, finite element modeling, automatic design, design scheme, stress-strain state.

REFERENCES

1. S a v e l ' e v, V.A. Strength and stability of metal mesh-span domes : dis. ... candidate of technical sciences [Text] / V.A. Savel'ev. — M., 1966. — 191 p.
2. A y r u m y a n, E.L. Recommendations for the design, fabrication and installation of structural frame low-rise buildings and attics of cold-formed galvanized steel profiles produced by «Balt-profile» [Text] / E.L. Ayrumyan. — M. : CNIIPSK th. N.P. Melnikov, 2004. — 70 p.
3. V e d y a k o v, I.I. Investigation the nodes mesh dome [Text] / I.I. Vedyakov, M.R. Uritsky, M.I. Farfel // Building Mechanics and Computation Facilities. — 2007. — N 3. — P. 63–69.
4. SNiP II-23–81. Steel Structures [Text].

# В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

УДК 620.172.21

С.И. ГЕРАСИМОВ, В.А. ЖИЛКИН, Г.М. ВЛАСОВ

## КОНТАКТНЫЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Рассматривается методика определения перемещений и деформаций на поверхности элементов конструкции с помощью контактного голографического интерферометра. Оптическая схема интерферометра основана на использовании голограмм Денисюка и малочувствительна к жестким перемещениям образца как целого. Приводятся результаты экспериментального исследования упругопластических деформаций изотропных и анизотропных материалов при статическом и повторном нагружении.

Ключевые слова: контактная голографическая интерферометрия, конструкционные материалы, упругопластические деформации.

### Введение

При решении упругопластических задач принимаемая идеализация свойств деформируемой среды и в особенности граничных условий зачастую не позволяет уверенно считать результаты, полученные согласно теоретическим решениям механики пластического формоизменения тел (если они имеются), соответствующими реальному процессу. Целью настоящей работы является развитие простого экспериментального метода исследования деформаций и напряжений в пластической зоне в конструкционных материалах с использованием контактных голографических интерферометров.

Контактный голографический интерферометр представляет собой совокупность исследуемой поверхности и прикрепленной к ней высокоразрешающей регистрирующей среды [1]. Такой способ используется для определения касательных и нормальных перемещений точек поверхности исследуемого объекта. Если голограмма записана вблизи металлизированного высокочастотного растра, то она восстанавливает информацию, свойственную нескольким оптическим методам: голографической интерферометрии, спекл-фотографии, голографическому муару и зеркально-оптическому методу. Для расшифровки интерференционных картин получены простые аналитические уравнения. Контактные голографические интерферометры эффективно используются для решения некоторых упругопластических задач.

При исследовании деформированного состояния массивных элементов конструкций регистрирующая среда на их поверхности может закрепляться механическими или магнитными прижимами, но такие приемы искажают деформированное состояние тонкостенных конструкций (срабатывает эффект подкрепления). В этом случае целесообразно прикреплять

© Герасимов С.И., Жилкин В.А., Власов Г.М., 2012

голографическую пластинку на поверхности объекта с помощью промежуточной оптически прозрачной среды (ПОС). Это обеспечивает: 1) минимальный вес прижимного устройства; 2) высокую виброзащищенность фоторегистрирующей среды (шумовые интерференционные полосы отсутствуют даже при записи голограмм размерами 30×40 см) [2]. Контактные голографические интерферометры позволяют отказаться от использования виброзащищенных голографических столов и записывать двухэкспозиционные и в реальном времени интерферограммы на стандартном испытательном оборудовании в условиях обычной испытательной лаборатории.

Фоточувствительная среда должна позволять записывать отражательные голограммы Денисюка. Если конструкция имеет форму оболочки вращения, то можно использовать ПОС и голографическую пленку. Специальные требования к качеству поверхности исследуемой конструкции не предъявляются. Для повышения точности измерения касательных перемещений желательно, чтобы индикатриса рассеяния поверхности тестируемой конструкции имела сферическую форму, так как в этом случае интерферометр позволяет наблюдать интерференционные полосы в диапазоне $\pm\pi/2$ полусферы.

## 1. Типы интерферометров

Пусть оси $x$, $y$ декартовой системы координат совпадают с фоторегистрирующей средой, а ось $z$ направлена по нормали к исследуемой поверхности (рис. 1). Хорошо известно, что основное уравнение метода голографической интерферометрии может быть записано как [3]

$$\Delta\vec{r}\cdot\vec{\rho}_{oi} = N_{oi}\lambda, \qquad (1)$$

где $\Delta\vec{r} = U\vec{i} + V\vec{j} + W\vec{k}$ — вектор перемещения;

$\vec{\rho}_{oi} = \vec{\rho}_o - \vec{\rho}_i$, $\vec{\rho}_o = \vec{i}\cos\alpha_o + \vec{j}\cos\beta_o + \vec{k}\cos\gamma_o$ — единичный вектор направления наблюдения ($\cos\alpha_o$, $\cos\beta_o$, $\cos\gamma_o$ — направляющие косинусы относительно осей $x$, $y$, $z$);

$\vec{\rho}_i = \vec{i}\cos\alpha_i + \vec{j}\cos\beta_i + \vec{k}\cos\gamma_i$ — единичный вектор направления освещения;

$N_{oi}$ — номер интерференционной полосы;

$\lambda$ — длина волны излучения лазера.

В интерферометрах типа *A*, *B* регистрирующая среда *2* закрепляется на недеформированной поверхности конструкции *1*. В большинстве случаев мы использовали в качестве ПОС синтетический каучук СКТН-А.

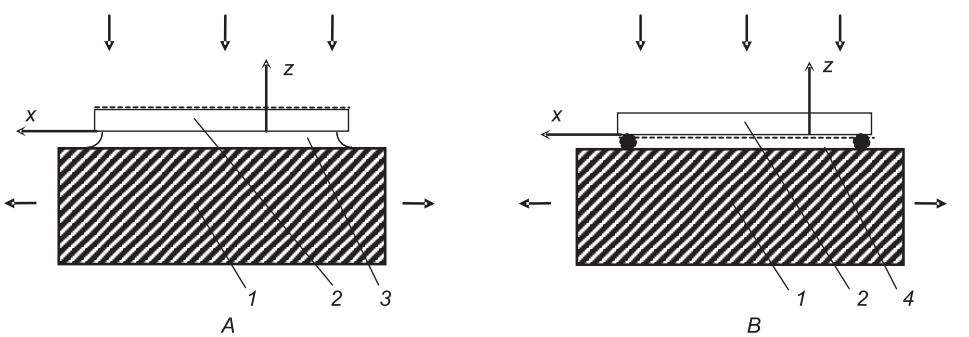



*Рис. 1.* Типы интерферометров (*A*, *B*)

*1* — исследуемый объект; *2* — голографическая пластинка; *3* — ПОС; *4* — металлизированный растр

Этот тип каучука полимеризуется при комнатной температуре с использованием катализатора К-18. Эксперименты показали, что удается получать ПОС со стабильными в широком температурном диапазоне оптико-механическими характеристиками (прозрачность, показатель преломления, модуль упругости), если соотношение массовых частей каучука и катализатора составляет 100:1. Контактный голографический интерферометр позволяет изучать квазистатические процессы деформирования. В этом случае голографическая пластинка неподвижна относительно поверхности исследуемого объекта и регистрирует только поле деформационных перемещений. При использовании He-Ne лазера время экспозиции составляет несколько секунд, и за это время шумовые колебания с частотами $\nu > 1$ Гц усредняются. При использовании импульсного лазера интерференционная картина соответствует суммарному полю перемещений — деформационному и шумовому. Высокочастотный растр 4 можно получить, если осветить голографическую пластинку двумя пересекающимися световыми пучками. После обычной фотографической обработки в вакуумной камере напыляется тонкий слой алюминия. Металлизированный отражательный растр на поверхности объекта получают как реплику с помощью эпоксидного клея.

## 2. Расшифровка интерференционных картин

В интерферометре типа *B* опорная плоская световая волна от лазера освещает голографическую пластинку по нормали ($a_i = 90°$, $b_i = 90°$, $\gamma_i = 180°$) и интерференционная картина наблюдается в отраженном свете. В этом случае уравнение (1) принимает вид

$$U\cos\alpha_0 + V\cos\beta_0 + W(1 + \cos\gamma_0) = N_{ro}\lambda, \qquad (2)$$

где индекс «*r*» соответствует номеру интерференционной полосы для этого случая.

В интерферометре типа *A* то же уравнение имеет вид

$$U\cos\alpha_0 + V\cos\beta_0 + W(n + \sqrt{n^2 - \sin^2\gamma_0}) = N_{ro}\lambda, \qquad (3)$$

где $n$ — показатель преломления ПОС.

Для получения раздельных значений компонент $U$, $V$ вектора перемещения $\Delta\vec{r}$ интерференционная картина наблюдается на бесконечности (в этом случае углы $\alpha, \beta, \gamma$ постоянны для всей поверхности голограммы) с четырех направлений, симметричных относительно оси $z$. Эти направления лежат попарно в плоскости *xoz* (направления *1* и *2*) и в плоскости *yoz* (направления *3* и *4*). С помощью таких четырех интерференционных картин мы можем определить компоненты перемещений

$$U = \frac{(N_{r1} - N_{r2})\lambda}{2\sin\gamma_x}; \qquad (4)$$

$$V = \frac{(N_{r3} - N_{r4})\lambda}{2\sin\gamma_y}, \qquad (5)$$

где $\gamma_x$ , $\gamma_y$ — углы, отсчитываемые от оси $z$ в плоскостях *xoz* и *yoz* соответственно;

$N_{ri}$ ($i$ = 1, 2, 3, 4) — номер интерференционной полосы.

Деформации $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ определяются из соотношений Коши численным дифференцированием.

## 3. Определение деформированного состояния изучаемого участка поверхности элемента конструкции

Одна голограмма, записанная методом двух экспозиций, содержит всю необходимую информацию для анализа изменений деформированного состояния изучаемой поверхности конструкции, которые произошли с ней в промежутке времени между двумя экспозициями. Регистрируя четыре интерференционные картины с четырех попарно симметричных относительно оси $z$ направлений и используя зависимости (4), (5), определим функции $U(x,y)$, $V(x,y)$. Так как голографическая интерферометрия фиксирует только малые перемещения, то компоненты $\varepsilon_x$, $\varepsilon_y$, $\gamma_{xy}$ тензора деформаций найдем согласно соотношениям Коши

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial V}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \tag{6}$$

численным или графическим дифференцированием экспериментально найденных функций $U$ и $V$. Квазиглавные деформации $\varepsilon_{1,2}$ на поверхности конструкции и их ориентацию вычислим по формулам

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{2}\left((\varepsilon_x + \varepsilon_y) \pm \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \gamma_{xy}^2}\right); \tag{7}$$

$$\operatorname{tg}\alpha_1 = 2\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_x}{\gamma_{xy}} \tag{8}$$

($\alpha_1$ — угол между направлением главной деформации $\varepsilon_1$ и осью $x$).

Деформацию $\varepsilon_z = \dfrac{\partial W}{\partial z}$ методом голографической интерферометрии непосредственно определить не удается. По экспериментальным данным можно найти только две частные производные $\dfrac{\partial W}{\partial x}$ и $\dfrac{\partial W}{\partial y}$, а с учетом того, что свободные от нагрузки площадки внешней поверхности конструкции являются главными, — еще две частные производные $\dfrac{\partial V}{\partial z} = -\dfrac{\partial W}{\partial y}$, $\dfrac{\partial U}{\partial z} = -\dfrac{\partial W}{\partial x}$, зная которые можно экстраполировать поведение функций $U$ и $V$ в подповерхностный слой изучаемого объекта. Деформацию $\varepsilon_z$ получают через деформации $\varepsilon_x$ и $\varepsilon_y$:

$$\varepsilon_z = -\frac{\mu^*(\varepsilon_x + \varepsilon_y)}{1 - \mu^*}, \tag{9}$$

где $\mu^* = 0{,}5 - (1 - 2\mu)E_c/2E$; $E$, $\mu$ — модуль упругости и коэффициент Пуассона материала конструкции,

$E_c = \sigma_0/\varepsilon_0$ — секущий модуль на кривой деформирования,

$\sigma_0 = \sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}$ — интенсивность напряжений,

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_i + (1 - 2\mu)\sigma_i/E,$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + 1{,}5\gamma_{xy}^2} \tag{10}$$

— интенсивность деформаций.

Итак, для того чтобы найти деформацию $\varepsilon_z$, необходимо предварительно построить обобщенную кривую деформирования $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ для материала изучаемой конструкции и зависимость переменного параметра

упругости $\mu^*$ от $\varepsilon_i$, но воспользоваться непосредственно этими зависимостями мы не можем, так как не известна $\varepsilon_z$, а следовательно, и $\varepsilon_i$. Для преодоления этого затруднения можно воспользоваться двумя путями:

1) учитывая незначительное влияние коэффициента Пуассона на распределение напряжений, положить $\mu = 0{,}5$, т.е. считать материал несжимаемым;

2) применить метод последовательных приближений: задаваясь $\mu_1^* = 0{,}5$, по зависимости (10) найти $\varepsilon_i^{(1)}$ и по графику $\mu^* = f(\varepsilon_i)$ — новое значение $\mu_2^*$, далее процесс продолжается до тех пор, пока $|\mu_n^* - \mu_{(n-1)}^*| < \Delta$ ($\Delta$ — принятая точность сходимости приближений). Последний прием, в частности, можно использовать и для определения границы между упругой и пластически деформированной зонами материала изделия.

При переходе к анализу напряженного состояния необходимо воспользоваться одним из известных условий пластичности (Треска либо Мизеса) и одной из известных моделей пластичности: деформационной теорией Генки — Ильюшина, теориями течения Сен-Венана — Мизеса и Прандтля — Рейса.

Как уже указывалось, метод голографической интерферометрии можно применять только при поэтапных способах записи информации. Поэтому зависимости (6)–(10) фактически определяют приращения компонент деформаций на очередном этапе нагружения конструкции. В зависимости от выбора точек на кривой деформирования, соответствующих первой и второй экспозициям фотоматериала, восстановленные картины интерференционных полос будут нести информацию о приращении деформаций, отвечающих либо активному нагружению, либо разгрузке, либо остаточному формоизменению изделия.

## 4. Экспериментальные результаты

### 4.1. Анализ деформированного состояния пластины из сплава Д16Т с центральным круговым отверстием при одноосном растяжении

Геометрические размеры исследуемого образца и диаграмма деформирования материала изделия приведены на рис. 2. Растягивающее усилие ориентировано вдоль оси симметрии, совпадающей с осью

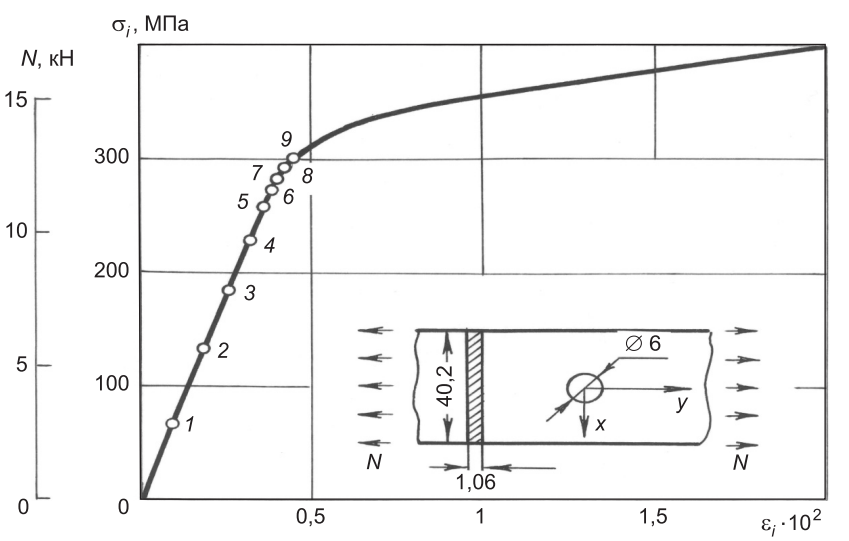



*Рис. 2.* Диаграмма деформирования

$y$. Перед испытаниями поверхность образца обрабатывалась мелкой абразивной бумагой для приближения формы индикатрисы рассеивания к сферической. Голограммы записывали на фотопластинки ЛОИ-2, закрепляемые на поверхности образца с помощью каучука СКТН-А, и проявляли в разбавленном (1:10) проявителе Петрова. Источником света служил He-Ne лазер ЛГ-38. Испытания образца проводили на испытательной машине ДМ-30; при записи голограмм в помещении поддерживали слабое зеленое освещение. Контроль процесса нагружения осуществляли тензодатчиками ПКБ 10-100, приклеенными клеем ЦИАКРИН-ЭО (два на удалении от концентратора, два вблизи опасных точек у контура отверстия). Точки на диаграмме деформирования соответствуют этапам нагружения и регистрации двухэкспозиционных голограмм.

Начиная с шестого этапа усилие на образец после окончания процесса нагружения падало (на рис. 2 указано конечное установившееся значение нагрузки). Вторую экспозицию осуществляли лишь тогда, когда скорость падения усилия становилась практически нулевой.

На рис. 3, *а–в* приведены фотографии, отвечающие первому ($P$ = 2,8 кН, $\Delta P$ = 2,8 кН), пятому ($P$ = 10,9 кН, $\Delta P$ = 1,2 кН) и восьмому ($P$ = 12,4 кН, $\Delta P$ = 0,5 кН) этапам нагружения ($P$ — полная нагрузка, $\Delta P$ — ее приращение на этапе).

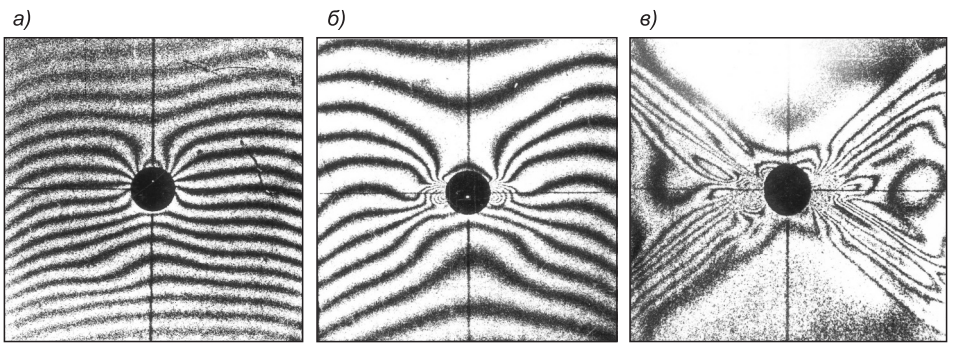



*Рис. 3.* Голографические интерферограммы

Количественная расшифровка голографических интерферограмм проведена для первых пяти этапов. Были построены поля деформаций $\varepsilon_x(x, y)$, $\varepsilon_y(x, y)$, $\gamma_{xy}(x, y)$.

Полагая $\mu^* = 0{,}5$, определяли $\varepsilon_i$, а затем по обобщенной кривой деформирования (см. рис. 2) находили $\sigma_i$. Начало пластического деформирования материала определяли по условию Мизеса $\sigma_i = \sigma_y$. Для нашего случая $\sigma_y$ = 333 МПа, $\varepsilon_i = 6{,}67 \cdot 10^{-3}$. На рис. 4 приведены эпюры $\sigma_y$ для степени пластического деформирования $\psi = 0{,}687$, полученные по теории малых упругопластических деформаций (1) и теории течения Сен-Венана — Леви — Мизеса (2) (совпадение эпюр удовлетворительное, как это и должно быть при простом нагружении), и эпюра остаточных напряжений (3) в опасном сечении образца как рассчитанная разность эпюр, одна из которых получена экспериментально, а другая вычислена по формулам теории упругости (4) в предположении идеальной упругости материала изделия.

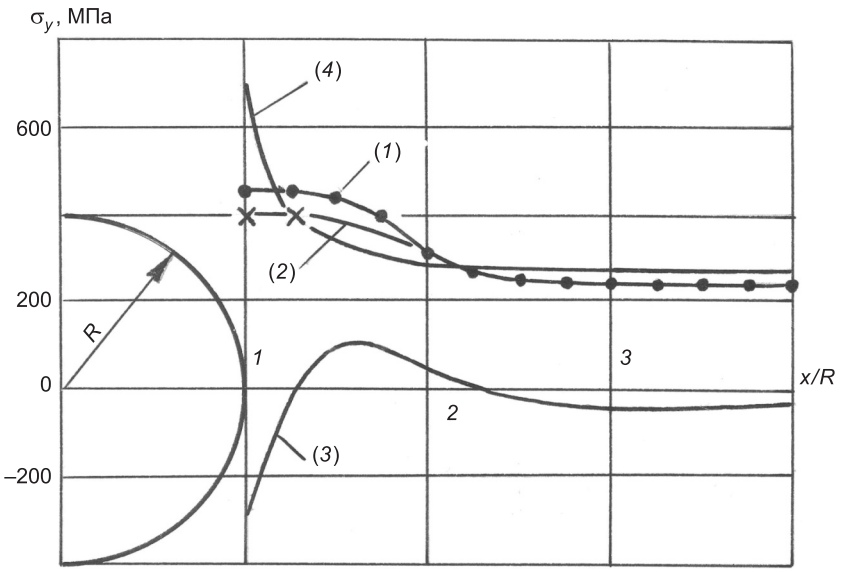



*Рис. 4.* Распределение $\sigma_y$ в опасном сечении

## 4.2. Регистрация релаксационных процессов в сплаве Д16Т

Толстую пластину с круговым концентратором подвергали пластическому деформированию в зоне отверстия посредством стального сплошного цилиндра, диаметр которого примерно в 3 раза превышал диаметр отверстия. После снятия нагрузки в пластине образовалось углубление в 1,6 мм. С помощью трехточечного контакта в реальном времени во встречных пучках записывалась голограмма такой деформированной поверхности. Спустя несколько суток была сфотографирована картина интерференционных полос, появившаяся за этот промежуток времени (рис. 5). На фотографии в полосах конечной ширины отчетливо прослеживается различный характер формоизменения внутри и вне деформированной зоны. Нормальное перемещение внутренней зоны составило около 0,5 мкм.

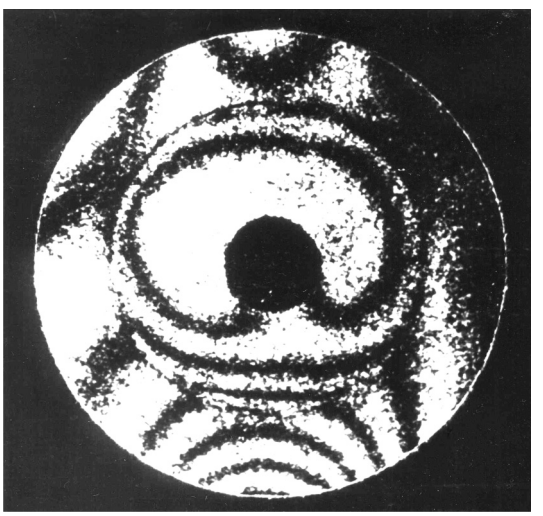


*Рис. 5.* Картина полос

## 4.3. Исследование деформаций образцов с выраженной кристаллической структурой

**Подготовка образцов.** Образцы с рабочей длиной 100 мм и поперечным сечением 16,2 × 1,5 мм изготавливали из технического алюминия фрезерованием. Затем их растягивали в испытательной машине ЦДМ-5/91, так как опытным путем установлено, что наибольший размер зерен в образце при отжиге и рекристаллизации получается при задании образцу начальной деформации 3 %. Удлинение образцов контролирова-

лось катетометром В-630. Отжиг производили в течение 3 ч при температуре 630 °С в кварцевой трубе, вставленной в рабочую зону муфельной печи СУОЛ. Охлаждали образцы в течение 14 ч вместе с выключенной печью. Длительность травления образцов в крепком растворе едкого натра NaOH составила 40...60 мин. Момент окончания травления определяли по самостоятельному отделению белого налета с поверхности образцов при их извлечении из кюветы.

Перед началом эксперимента для определения границ зерен поверхности образцы фотографировали при различных направлениях их освещения (оптическая ось фотоаппарата устанавливалась перпендикулярно поверхности образца). Затем на поверхность образцов наносили металлизированные скрещенные растры с частотой линий $\psi_x = \psi_y = \psi = 840$ мм$^{-1}$. Расположение зерен на одной из исследованных поверхностей образца приведено на рис. 6.

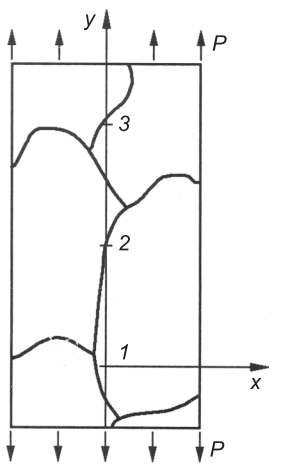



*Рис. 6.* Поликристаллический образец

| $n$ | $P$, кН | $\Delta l \cdot 10^{-5}$, м |
|---|---|---|
| 1 | 0,15 | 10 |
| 2 | 0,25 | 17 |
| 3 | 0,35 | 31 |
| 4 | 0,46 | 51 |
| 5 | 0,55 | 93 |
| 6 | 0,59 | 112 |
| 7 | 0,60 | 122 |
| 8 | 0,60 | 134 |
| 9 | 0,60 | 144 |
| 10 | 0,60 | 159 |
| 11 | 0,60 | 178 |

**Деформации в зернах металла при статическом нагружении.** На каждом из 11 этапов нагружения образца растягивающей силой $P$ записывались голографические интерферограммы. Удлинение образца $\Delta l$ контролировалось индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм. Номера голограмм $n$, нагрузки $P$, приложенные к образцу, и его удлинения $\Delta l$ представлены в таблице.

Фотографии интерференционных картин, наблюдаемых в ±1-м порядке дифракции в отраженном свете в плоскости $yOz$, представлены на рис. 7,*а*,*б* для 6-го и 11-го этапов нагружения соответственно. Фотографирование картин полос производили перпендикулярно поверхности образца, а освещали голограмму под углом $\gamma = 32{,}3°$ в направлении первых дифракционных порядков растра.

На поверхности поликристаллического образца можно выделить несколько характерных зон: области зерен и границы раздела между зернами (продольная ось симметрии образца практически совпала с границами зерен, в окрестности точек *2* и *1* пересекаются три границы (рис. 6)).

Анализируя картины интерференционных полос, можно отметить следующее.

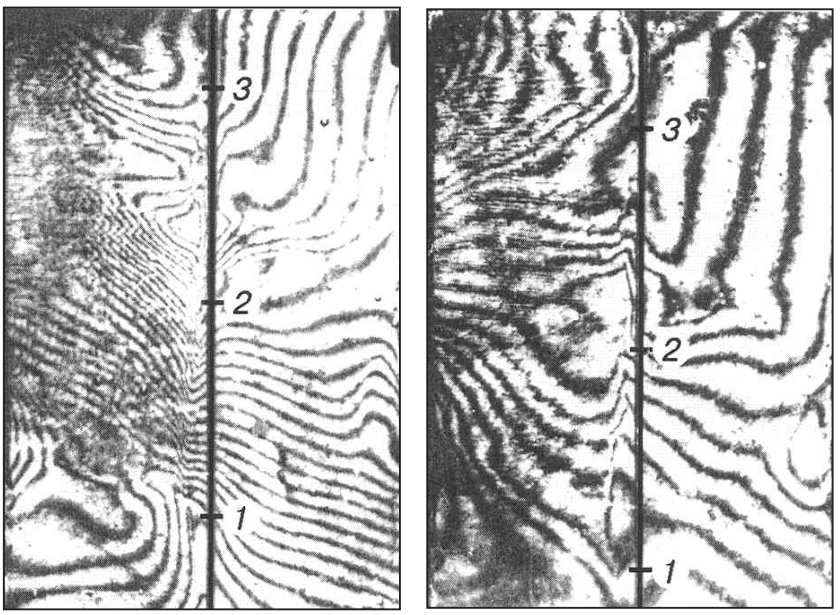



*Рис. 7.* Картина полос

- На первых двух этапах нагружения образец деформируется квазиоднородно.
- На третьем этапе образец деформируется более интенсивно в области границ зерен в нижней части образца. Однако ввиду малой частоты интерференционных полос невозможно оценить уровень неоднородности деформирования зерен и их границ.
- На последующих этапах нагружения образца его материал деформируется неоднородно. На правой от оси симметрии половине образца значителен вклад сдвиговых деформаций и жестких поворотов зерен (на рис. 7 видно, что зерно, расположенное в правом верхнем углу, поворачивается как жесткое целое, так как в этой области градиент интерференционных полос близок к постоянному, а углы наклона полос к оси $x$ близки к 90°).
- По мере нагружения образца характер деформирования отдельных его участков меняется. На 11-м этапе нагружения образца вся внешняя нагрузка (около 0,6 кН) воспринимается только границей между зернами в нижней части образца.

Количественная расшифровка интерферограмм проведена для шестого этапа нагружения. Использовались программы USMI160 и USMI159 локальной параболической аппроксимации функции порядков полос $N(x, y)$. Программа USMI160 предназначена для аппроксимации значений $N(x, y)$ в узлах неравномерной сетки и вычисления ее первой производной. Программа USMI159 позволяет осуществлять линейную комбинацию полей $N(x, y)$ для различных направлений наблюдения.

С целью проверки предположения о волновом характере пластической деформации на основе полученных экспериментально картин полей локальных сдвигов $\gamma_{xy}$ и локальных поворотов $\omega_z$ приведены распределения этих компонент на продольной оси симметрии образца при увеличении полной деформации образца от 0,58 до 0,70 % (рис. 8). Распределение сдвиговой компоненты деформации в пределах одного зерна имеет экстремум, расположенный вблизи его центра [4].

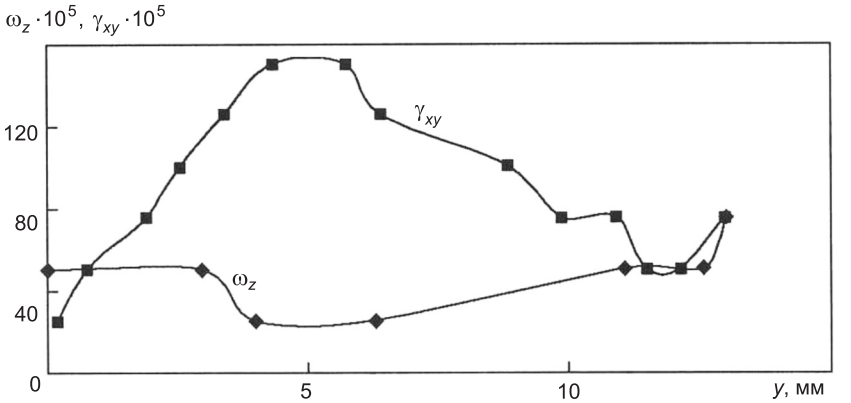



*Рис. 8.* Распределение $\gamma_{xy}$ и $\omega_z$ вдоль оси симметрии

**Деформации в зернах металла при повторном нагружении.** При повторном нагружении расположение зерен в образце подобно показанному на рис. 6. В ходе эксперимента образец последовательно нагружался от 0 до 0,5 кН с шагом $\Delta P$ = 0,05 кН.

В процессе нагружения (первый цикл) в диапазоне 0,15...0,30 кН записывали двухэкспозиционную голограмму (рис. 9, *а*). При разгрузке (первый цикл) в диапазоне 0,30...0,15 кН регистрировали вторую интерферограмму. Полученная картина полос имела регулярную структуру и была идентична изображенной на рис. 9, *в*. Второй цикл нагружения был проведен через 5 мин после окончания первого. Полученные две интерферограммы имели регулярную систему полос, подобную представленной на рис. 9, *в*. После двухциклового нагружения образец выдерживали при комнатной температуре в свободном состоянии в течение 48 ч, затем испытания повторяли. При нагрузках 0,15 и 0,30 кН для третьего цикла записаны интерферограммы, картины полос которых представлены на рис. 9, *б*, *в*. Из проведенных экспериментов следует:

— при первом нагружении образца диаграмма $P-\Delta l$ имеет нелинейный характер и кривая близка к параболе, интерференционная картина имеет нерегулярную структуру и в некоторой степени повторяет картину зерен, большинство полос имеет изломы;

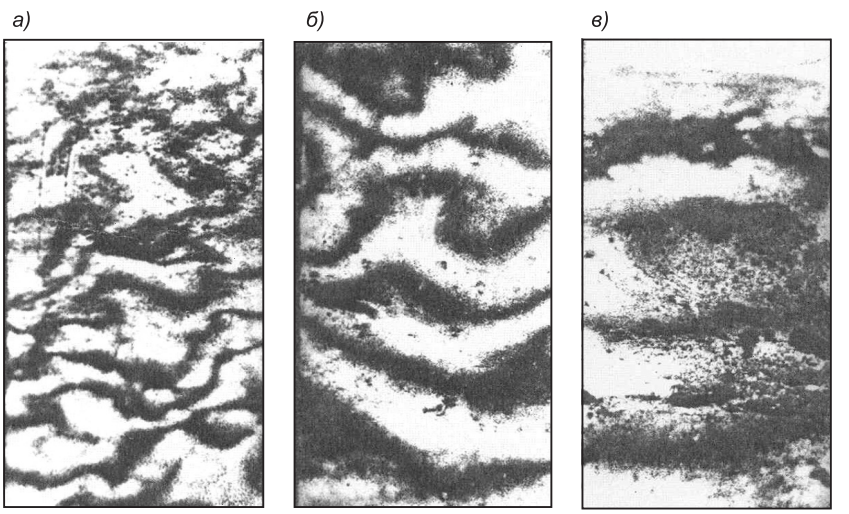



*Рис. 9.* Картина полос

— при первой разгрузке образца диаграмма $P-\Delta l$ линейна, картина полос имеет регулярную структуру и представляет собой обычную картину сжатия;

— после выдержки образца в течение 24...48 ч картина первого нагружения качественно повторялась, т.е. можно говорить о наличии эффекта разупрочнения.

**Выводы.** Из экспериментальных данных следует, что в упругой области результаты расчетов методом конечных элементов и методом голографической интерферометрии практически совпадают. В упругопластической области полученные экспериментально поля перемещений и деформаций могут служить основой для последующего численного определения напряженного состояния конструкции. Контактная голографическая интерферометрия обладает достаточной наглядностью, для того чтобы правильно оценивать характер процесса деформирования, не производя количественной расшифровки интерферограмм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. Жилкин, В.А. Способ исследования неоднородно деформированных зон изделий в реальном времени с использованием голограмм Ю.Н. Денисюка [Текст] / В.А. Жилкин, С.И. Герасимов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1983. — № 1. — С. 139–141.
2. Герасимов, С.И. Исследование процесса полимеризации прозрачного эластомера методом голографической интерферометрии [Текст] / С.И. Герасимов // Изв. вузов. Строительство. — 2006. — № 6. — С. 101–104.
3. Zhilkin, V.A. Application of the superposed holographic interferometers to deformation measurement problems [Text] / V.A. Zhilkin, S.I. Gerasimov, V.B. Zinovjev // Proc. SPIE. — 1989. — V. 1121. — P. 228–233.
4. Герасимов, С.И. Исследование деформаций поликристаллических образцов методом накладной голографической интерферометрии [Текст] / В.А. Жилкин, С.И. Герасимов // Прикладная механика и техническая физика. — 2000. — Т. 41, № 1. — С. 218–222.



*ГЕРАСИМОВ Сергей Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: Gerasimov@stu.ru*
*Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск*
*ЖИЛКИН Виталий Афанасьевич, д-р техн. наук, проф.*
*Челябинская государственная агроинженерная академия*
*ВЛАСОВ Георгий Михайлович, д-р техн. наук, проф.*
*Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск*



Получено 28.02.12



**Gerasimov Sergey Ivanovich,** doctor of technical sciences, professor; E-mail: Gerasimov@stu.ru, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia
**Zhilkin Vitaly Afanasiyevich**, doctor of technical sciences, professor; Chelyabinsk State Agroengineering Academy, Russia
**Vlasov Georgy Mihailovich,** doctor of technical sciences, professor; Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia


## THE CONTACT HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY METHOD FOR STUDY OF ELASTO-PLASTIC PROBLEMS OF CONSTRUCTION ELEMENTS


Consideration is given to an method for displacement and strain measurements on the specimen surface using a contact holographic interferometer. The optical scheme of the interferometer is based on application of the Denisyuk holograms and it is low sensitive to

rigid displacements of the specimen as a whole. The elastoplastic strains of isotropic and anisotropic materials under static loading and reloading are experimentally studied.

K e y  w o r d s: contact holographic interferometry, structural materials, elasto-plastic strains.

## REFERENCES

1. Z h i l k i n, V.A. Investigation in real time the heterogeneous strain's zones in solids by the Denisuk holograms [Text]/ V.A. Zhilkin, S.I. Gerasimov // News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture. — 1983. — N 1. — P. 139–141.
2. G e r a s i m o v, S.I. Investigation of cyclic stability of transparent elastomer by holographic interferometry [Text] / S.I. Gerasimov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2006. — N 6. — P. 101–104.
3. Z h i l k i n, V.A. Application of the superposed holographic interferometers to deformation measurement problems [Text]/ V.A. Zhilkin, S.I. Gerasimov, V.B. Zinovjev // Proc. SPIE. — 1989. — V. 1121. — P. 228–233.
4. G e r a s i m o v, S.I. Strain analysis of polycrystalline specimens by the method of superimposed holographic interferometry [Text] / V.A. Zhilkin, S.I. Gerasimov // J. Appl. Mech. Tech. Phys. (USA). — 2000. — V. 41, N 1. — P. 218–222.

УДК 539.376

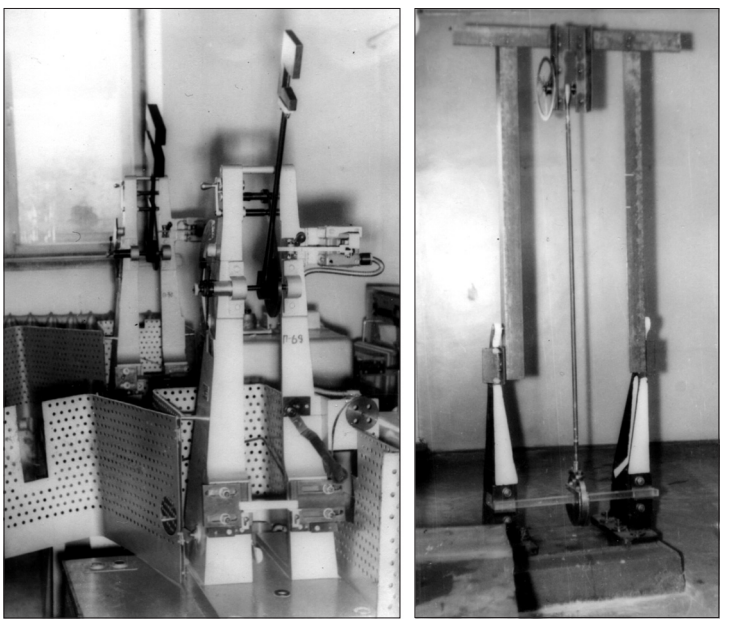
Б.П. РУСОВ

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ПРОЧНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ БАЛОК ПРИ УДАРЕ

Собран большой копер. Наряду с этим испытывались образцы на стандартных копрах. Делалось сравнение результатов эксперимента по разрушению трещин в образцах.

Ключевые слова: полимерные балки, удар, копер Шарпи, нелинейное деформирование, разрушение образца, интегральное уравнение, удельная энергия.

Для экспериментальной проверки прочности полимерных балок при ударе был изготовлен большой маятниковый копер (см. рисунок). Конструкция копра основана на копре Шарпи. Опоры копра Шарпи были раздвинуты так, что расстояние между ними стало 60 см. Опоры крепились болтами к чугунной плите толщиной 50 мм, которая была забетонирована. Ось качания маятника поднята вверх. Таким образом был удлинен стержень, к которому подвешен молот. В качестве стержня использована стальная труба внешним диаметром 22 мм и внутренним диаметром 18 мм.



Копры

В качестве указателя использована шкала копра Шарпи (в градусах). Для того чтобы потери на деформацию смятия были меньше, ударник копра Шарпи был заменен другим. Радиус закругления ударника 20 мм. Так как длина маятника увеличена, то центр удара несколько поднялся. Для того чтобы вывести центр удара в середину ударника, к молоту Шарпи с двух сторон болтами крепились два диска, которые упирались в ударник. Рас-

© Русов Б.П., 2012

стояние от оси качания до центра удара определялось по формуле $L = qT^2/2\pi^2$. Ускорение силы тяжести $g$ = 981,52 см/с. После того как был выверен центр удара, определялась реакция $G$ на расстоянии $L$ = 194 см от оси качания. Оказалось, что реакция $G$ = 14,02 кг. Таким образом, характеристика копра $GL$ = 140,2 · 194 = 27198,8 = 27 200 Н · м.

В качестве основного нелинейного закона деформирования рассмотрим зависимость, предложенную Ю.Н. Работновым [1].

$$\varphi(\varepsilon(t)) = \sigma(t) + \int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau, \qquad (1)$$

где $\varphi(\varepsilon(t))$ — некоторая нелинейная функция, которая характеризует кривую деформации при мгновенном нагружении.

Решая интегральное уравнение относительно $\sigma(\tau)$, получим

$$\sigma(t) = \varphi(\varepsilon(t)) + \int_0^t R(t-\tau)\varphi(\varepsilon(t))d\tau, \qquad (2)$$

где $R(t-\tau)$ — резольвента ядра $K(t-\tau)$.

Функцию $\varphi(\varepsilon(t))$ аппроксимируем степенной зависимостью

$$\varphi[\varepsilon(t)] = N\varepsilon^n(t), \qquad (3)$$

где $N$, $n$ — некоторые положительные постоянные.

Подсчитаем работу деформации при испытаниях по Шарпи. В этом случае работа деформации единицы объема в любой точке балки будет равна

$$a = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon = \frac{N}{n+1}\left\{\varepsilon^{n+1}(t) - (n+1)\int_0^t \dot{\varepsilon}(t)dt\int_0^t R(t-\tau)\varepsilon^n(\tau)d\tau\right\}. \qquad (4)$$

Работа деформации всей балки с учетом симметрии и сделанных выше допущений запишется как

$$A = \frac{4Nb}{n+1}\int_0^{l/2}\int_0^{h/l}\left\{\varepsilon^{n+1}(x,y,t) - (n+1)\int_0^t \dot{\varepsilon}(x,y,t)dt\int_0^t R(t-\tau)\varepsilon^n(x,y,t)d\tau\right\}dxdy. \qquad (5)$$

Используя гипотезу плоских сечений, запишем уравнение

$$N\chi^n(x,t)y^n = \sigma(t) + \int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau.$$

Умножим последнее соотношение на $y$ и проинтегрируем по площади поперечного сечения:

$$\int_F N\chi^n(x,t)y^{n+1}dF = \int_F \sigma(x,y,t)ydF + \int_F\left[\int_0^t K(t-\tau)\sigma(x,y,\tau)d\tau\right]ydF.$$

Меняя порядок интегрирования в последнем слагаемом и учитывая, что $\int_F \sigma(x,y,t)ydF = M$ — изгибающий момент, а $\int_F y^{n+1}dF = J_{n+1}$ — момент инерции порядка $n$ + 1, получим

$$\chi(x,t) = \left(\frac{1}{NJ_{n+1}}\right)^{\frac{1}{n}}\left[M(x,t) + \int_0^t K(t-\tau)M(x,\tau)d\tau\right]^{\frac{1}{n}}. \qquad (6)$$

Учитывая, что $M(x,t)=P(t)x/2$, формулу для работы деформации после некоторых преобразований запишем так:

$$A=\frac{4Nb}{(n+1)(2NJ_{n+1})^{\frac{n+1}{n}}}\times$$

$$\times\int_0^{l/2}\int_0^{h/2}\left\{P_*^{n+1}(t)-(n+1)\int_0^t\dot{P}_*(t,\tau)dt\int_0^t R(t-\tau)P_*^n(\tau)dt\right\}x^{\frac{n+1}{n}}y^{n+1}dxdy.$$

Здесь

$$P_*(t)=\left[P(t)+\int_0^t K(t-\tau)P(\tau)\,d\tau\right]^{\frac{1}{n}},$$

$$\dot{P}_*(t)=\frac{d}{dt}\left[P(t)+\int_0^t K(t-\tau)P(\tau)\,d\tau\right]^{\frac{1}{n}}.$$

Интегрируя последнее выражение и учитывая, что

$$\varepsilon_{\max}(l/2,t)=\chi(l/2,t)\frac{h}{2}=\left(\frac{1}{2}NJ_{n+1}\right)^{\frac{1}{n}}\frac{h}{2}\left(\frac{l}{2}\right)^{\frac{1}{n}}P_*(t,\tau),$$

после некоторых простых преобразований найдем

$$A=\frac{nNbhl}{(n+1)(n+2)(2n+1)}\left\{\varepsilon_{\max}^{n+1}(t)-(n+1)\int_0^t\dot{\varepsilon}(t)dt\int_0^t R(t-\tau)\varepsilon_{\max}^n(\tau)d\tau\right\}. \qquad (7)$$

Из выражения (7) видно, что работа деформации от изгибающего момента для нелинейной вязкоупругой балки, как и для линейной, прямо пропорциональна объему образца, но несколько иначе выражается через $\varepsilon_{\max}(t)$ и $\dot{\varepsilon}_{\max}(t)$ и, кроме того, зависит от коэффициентов $N$ и $n$.

$$W=\frac{A}{bhl}=\frac{hN}{(n+1)(n+2)(2n+1)}\left\{\varepsilon_{\max}^{n+1}(t)-(n+1)\int_0^t\dot{\varepsilon}_{\max}(t)dt\int_0^t R(t-\tau)\varepsilon_{\max}^n(\tau)d\tau\right\}. \quad (8)$$

При $N=E$ и $n=1$, как и следовало ожидать, из выражения (7) получаем уравнение Больцмана–Вольтерра.

Для того чтобы выдержать условия, копер должен иметь сменные молоты разного веса, которые можно было бы поднимать на произвольно заданную высоту.

Испытания проводились на маятниковых копрах КМ-0,5Т, КМ-5Т и копре, изображенном на рисунке.

Из выражения (8) видно, что если испытания на удар образцов разных размеров проводить так, чтобы выражения в фигурных скобках в этих равенствах оставались одинаковыми, то для данного материала отношение $W=A/bhl$ будет одним и тем же для разных образцов. Для этого необходимо испытания образцов разных размеров проводить так, чтобы закон изменения $\dot{\varepsilon}_{\max}(t)$ был одинаков, так как в этом случае подынтегральные функции и пределы интегрирования выражения (8), функции $\varepsilon_{\max}(t)$, величины $\varepsilon_{\max}^P$, при которых происходит разрушение, и коэффициенты разложения будут одинаковыми для разных образцов.

Найдем условия испытания, когда, например, выражение (8) будет одинаковым для разных образцов.

Принимая $\chi = -d^2y / dx^2$, равенство (6) перепишется так:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\left(\frac{1}{NJ_{n=1}}\right)^{\frac{1}{n}} \left[ M(X,T) + \int_0^t K(t-\tau) M(x,\tau) d\tau \right]^{\frac{1}{n}}.$$

Подставляя в него значения изгибающих моментов на первом участке

$$M(x,t) = \frac{P(t)}{2} x,$$

и на втором участке

$$M(x,t) = \frac{P(t)}{2} x - P(t)\left(x - \frac{l}{2}\right),$$

получим систему

$$(NJ_{n+1})^{\frac{1}{n}} \frac{d^2y_{\text{I}}}{dx^2} = -\left[P_*(t)\frac{x}{2}\right]^{\frac{1}{n}},$$

$$(NJ_{n+1})^{\frac{1}{n}} \frac{d^2y_{\text{II}}}{dx^2} = -\left[P_*(t)\left(\frac{l}{2} - \frac{x}{2}\right)\right]^{\frac{1}{n}},$$

где

$$P_{x(t)} = P(t) + \int_0^t K(t-\tau) P(\tau) d\tau.$$

Интегрируя первое уравнение, последовательно найдем

$$\begin{aligned} (NJ_{n+1})^{\frac{1}{n}} \frac{dy_{\text{I}}}{dx} &= -\left[\frac{P_*(t)}{2}\right]^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} x^{\frac{n+1}{n}} + C, \\ (NJ_{n+1})^{\frac{1}{n}} y_{\text{I}} &= -\left[\frac{P_*(t)}{2}\right]^{\frac{1}{n}} \frac{n^2}{(n+1)(2n+1)} + c, x + c_2. \end{aligned} \tag{9}$$

Интегрируя второе уравнение, получим

$$(NJ_{n+1})^{\frac{1}{n}} \frac{dy_{\text{II}}}{dx} = +\left[\frac{P_*(t)}{2}\right]^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} (l-x)^{\frac{n+1}{n}} + d_1,$$

$$(NJ_{N+1})^{\frac{1}{n}} y_{\text{II}} = -\left[\frac{P_x(t)}{2}\right]^{\frac{1}{n}} \frac{n^2}{(n+1)(2n+1)} (l-x)^{\frac{2n+1}{n}} + d_1 x + d_2.$$

Определяя постоянные интегрирования из условий:

при $x = 0$ $y_{\text{I}} = 0$, при $x = l$ $y_{\text{п}} = 0$,

при $x = \frac{l}{2}$ $\frac{dy_{\text{I}}}{dx} = \frac{dy_{\text{II}}}{dx}$, $y_{\text{I}} = y_{\text{II}}$

и подставляя в уравнение (9), найдем прогиб на первом участке:

$$y(x,t) = \left[\frac{P_*(t)}{2NJ_{n+1}}\right]^{\frac{1}{n}} \frac{n}{n+1} x \left[ -\frac{n}{2n+1} x^{\frac{n+1}{n}} + \left(\frac{l}{2}\right)^{\frac{n+1}{n}} \right].$$

Максимальный прогиб при $x = l/2$ равен

$$y_{\max}(t) = \frac{n}{2n+1}\left(\frac{l}{2}\right)^{\frac{2n+1}{n}}\left(\frac{1}{2NJ_{n+1}}\right)^{\frac{1}{n}}\left[P(t) + \int_0^t K(t-\tau)P(\tau)d\tau\right]^{\frac{1}{n}}. \qquad (10)$$

Из выражений (6) и $\varepsilon(x,y,t) = \chi(x,t)y$ следует

$$\varepsilon_{\max}(l2t) = \chi(l2t)\frac{h}{2} = \left(\frac{1}{2NJ_{n+1}}\right)^{\frac{1}{n}}\left[P(t) + \int_0^t K(t-\tau)P(\tau)dt\right]^{\frac{1}{n}}\frac{h}{2}\left(\frac{l}{2}\right)^{\frac{1}{n}}. \qquad (11)$$

Выражая $y_{\max}(t)$ через $\varepsilon_{\max}(t)$ из равенств (10), (11) и дифференцируя по времени, найдем

$$\dot{y}_{\max}(t) = \frac{n}{2(2n+1)}\frac{l^2}{h}\dot{\varepsilon}_{\max}(t). \qquad (12)$$

Будем считать удар молота об образец неупругим и центральным. Тогда скорости молота и образца после соприкосновения будут одинаковыми и равны

$$\upsilon = \frac{M_1u_1 + M_2u_2}{M_1 + M_2},$$

где $u_1 = \sqrt{2gH}$ — скорость молота в момент соприкосновения с образцом;

$g$ — ускорение силы тяжести;

$H$ — высота подъема центра удара молота до удара;

$u_2$ — скорость молота после удара;

$M_1$ — масса молота;

$M_2$ — приведенная масса образца.

Так как масса образца значительно меньше массы молота, то, пренебрегая $M_2$ по сравнению с $M$, получим $\upsilon = u_1$, т.е. в момент начала деформирования образца $t = 0$ $\dot{y}_{\max}(t) = \upsilon_1 = u_1$. В момент $t = t_1$, когда образец разрушается, $\dot{y}_{\max}(t) = \upsilon_2 = \sqrt{2gH_1}$. Здесь $H_1$ — высота подъема центра удара молота после разрушения образца.

В первом приближении примем, что центр тяжести среднего поперечного сечения балки движется с постоянной скоростью:

$$\dot{y}_{\max} = \frac{\upsilon_1 + \upsilon_2}{2} = \sqrt{\frac{g}{2}}\frac{h}{l^2}(\sqrt{H} + \sqrt{H_1}). \qquad (13)$$

Это допущение будет тем более оправдано, чем больше масса молота. Тогда из выражений (12) и (13) следует

$$\dot{\varepsilon}_{\max} = \frac{2(2n+1)}{n}\sqrt{\frac{g}{2}}\frac{h}{l^2}(\sqrt{H} + \sqrt{H_1}). \qquad (14)$$

Если при испытаниях образцов одинаковой ширины, но разной толщины и при разном расстоянии между опорами выдержать, чтобы величина

$$\frac{h}{l^2}(\sqrt{H} + \sqrt{H_1}) = \text{const}, \qquad (15)$$

то подынтегральные функции и пределы интегрирования в равенстве (8) будут одинаковыми, так как если $\dot{\varepsilon}_{max} = \text{const}$, то $\varepsilon_{max}(t) = kt$, а деформация $\varepsilon^0_{max} = kt_0$, при которой начинает раскрываться трещина, будет величиной постоянной. Поэтому при выполнении условия (15) величина

$$W = A / bhl \tag{16}$$

будет одинаковой для образцов, имеющих различные размеры $h$ и $l$. Из выражения (14) следует, что скорость деформирования образца при ударе зависит не только от подъема молота до удара, но и величины взлета молота после разрушения образца. При изменении ширины образца необходимо менять вес молота и величину подъема его так, чтобы выполнялось условие

$$W = \frac{A}{bhl} = \frac{P(h_* - h_{1*})}{bhl} = \frac{P_0(h^0_* - h^0_{1*})}{b_0 h_0 l_0} = \text{const}, \tag{17}$$

где $b_0, h_0, l_0, P_0, h^0_*, h^0_{1*}$ — параметры образца, вес молота и высота подъема его центра тяжести до удара и после разрушения образца при первом произвольном испытании.

Удобнее всего при испытании образцов разной ширины положить $h_* = h^0_*, h_{1*} = h^0_{1*}$, тогда при $h = h_0$ и $l = l_0$ из последнего соотношения имеем

$$P = P_0 b / b_0 .$$

В этом случае независимо от материала вес молота должен меняться прямо пропорционально ширине образца.

Найдем условия испытания, при которых выражение (8) будет одинаковым для разных образцов, и введем результаты в таблицу.

| Материал | $b$, $h$, $l$, см | $a$, (Н · см)/см$^2$ | $W$, (Н · см)/см$^3$ | $\Delta W$, (Н · см)/см$^3$ |
|---|---|---|---|---|
| Оргстекло | Образец 0,6; 0,9; 10<br>Балка 3,0; 4,6; 60 | 230<br>1230 | 2,3<br>2,2 | 1,4<br>2,5 |
| Полистирол | Образец 0,6; 0,8; 10<br>Балка 3,1; 4,0; 60 | 92<br>528 | 9,2<br>8,8 | 0,56<br>1,11 |

Таким образом, во всех рассмотренных случаях, если испытания образцов разных размеров проводить так, чтобы выполнялись условия (15) и (17), то величина отношения работы деформации от изгибающего момента к объему образца, заключенного между опорами, $A / bhl$ будет одинаковой для разных образцов. Из таблицы видно, что значения ударной вязкости образцов из оргстекла и полистирола сильно различаются. Величина $W$ для образцов одинакова. Эксперименты показывают, что формулы оказываются одинаковыми как для образцов, так и для балок.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Работнов, Ю.М. Ползучесть элементов конструкций [Текст] / Ю.М. Работнов. — М. : Наука, 1966. — 752 с.

*РУСОВ Борис Петрович, д-р техн. наук, проф.*
*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено 24.02.12

**Rusov Boris Petrovich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## EXPERIMENTAL CHECK OF DURABILITY POLYMERIC BEAMS AT BLOW

The big poppet is accurate. Along with it samples on standard copras were tested. Comparison of results of experiment on destruction of cracks in samples became.

Key words: polimeric beams, blow, poppet of Sharpi, nonlinear deformation, sample destruction, integrated equation, specific energy.

REFERENCES

1. Rabotnov, Yu.M. Creep of Elements of Desings [Text] / Yu.M. Rabotnov. — M. : Science, 1966. — 752 p.

# НАШИ ЮБИЛЯРЫ

## Геннадию Борисовичу ЛЕБЕДЕВУ — 75 лет

29 апреля 2012 года исполнилось 75 лет кандидату технических наук, доценту, заместителю главного редактора журнала «Известия вузов. Строительство» Геннадию Борисовичу Лебедеву. Трудовую деятельность он начал с 1959 г., после окончания Новосибирского инженерно-строительного института им. В.В. Куйбышева, ныне НГАСУ (Сибстрин), в должности ассистента, а с 1971 г. — доцента на кафедре «Строительная механика». В 1968 г. Геннадий Борисович защитил кандидатскую диссертацию и успешно совмещает научную и педагогическую деятельность. Он авторитетный специалист в области теории сооружений, опубликовал ряд научных работ, посвященных теоретическим и экспериментальным исследованиям кинетики сыпучих сред, расчету и оптимизации различных видов строительных конструкций. С 1982 по 1989 г. Геннадий Борисович возглавлял кафедру «Теоретическая механика», затем вернулся в должности доцента на кафедру «Строительная механика». Геннадий Борисович — замечательный педагог, пользуется любовью и уважением студентов. С 1993 г. и по настоящее время Г.Б. Лебедев в должности заместителя главного редактора нашего журнала курирует тематические разделы по строительным конструкциям, теории инженерных сооружений, основаниям и фундаментам, строительству автодорог и мостов. Сочетая в себе глубокую научную и инженерную эрудицию с исключительной ответственностью, объективностью и доброжелательностью в отношениях с авторами и рецензентами научных статей, Геннадий Борисович вносит весомый вклад в решение важной задачи — поддержания высокого научного уровня журнала.

***Коллектив редакции журнала, коллеги по научно-педагогической работе сердечно поздравляют Геннадия Борисовича с юбилеем и желают ему доброго здоровья, энергии и успехов во всех делах.***

## ГАЗОБЕТОН НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ КАМНЕДРОБЛЕНИЯ

**Сырьевыми материалами для получения неавтоклавного газобетона в основном являются: портландцемент, кварцевый песок-наполнитель, вода, газообразователь и различные добавки. Для обеспечения требуемой прочности и низкой средней плотности, обязательной в технологии, является энергоемкая операция помола кварцевого песка. Специалистами Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин) впервые предложено использовать в производстве ячеистых бетонов в качестве наполнителя дисперсные попутные продукты из систем пылеулавливания, образующиеся при дроблении альбитофировых и диабазовых горных пород на щебень для бетонов. Альбитофировые и диабазовые отходы через систему пылеулавливания поступают в запасные бункера в мелкодисперсном виде и могут использоваться в качестве наполнителя в ячеистых бетонах без дополнительного помола.**

**Разработаны составы ячеистого бетона на дисперсных отходах камнедробления альбитофировых и диабазовых горных пород, на основе которых получен газобетон по плотности марок D600, D700 и по прочности классов B1,5, B2 при использовании в качестве вяжущего портландцемента М400 Д20. Также возможно изготовление теплоизоляционных газобетонных изделий марки D400.**

**Преимуществом предлагаемой технологии является использование отходов промышленности и отсутствие операции помола наполнителя, что уменьшает расходы на производство газобетонных изделий.**

**Газобетон на дисперсных отходах камнедробления альбитофировых и диабазовых горных пород рекомендуется для изготовления мелких конструкционно-теплоизоляционных стеновых блоков и теплоизоляционных изделий.**

**Автор разработки Л.В. ЗАВАДСКАЯ, канд. техн. наук**

**630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин).**

**E-mail: ntio-ngasu@yandex.ru**

**www. sibstrin.ru**

**Тел.\факс: (8-383)-266-25-27**

# ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ[1]

**1.** К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:

— *сопроводительное письмо* руководства организации, откуда исходит рукопись;

**к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи[2] за подписью автора или руководителя представляющей статью организации.** ***Плата за публикацию статей аспирантов не взимается.*** **Гарантийное письмо не требуется, если статья представляется организацией, осуществляющей целевые взносы на издание нашего журнала;**

— *рекомендацию* соответствующей кафедры вуза (заверенную выписку из протокола заседания кафедры);

— *экспертное заключение* о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись;

— *разрешение* Роспатента на открытую публикацию материалов по заявке на изобретение.

**2.** Рукопись должна готовиться на компьютере в программе Microsoft Word и представляться в редакцию распечатанной *в двух экземплярах*, с приложением ее записи на CD (3", 5").

Текст рукописи набирают шрифтом Times New Roman Cyr размером 14 пт. с межстрочным интервалом 1,5. Объем рукописи — до 10 страниц. Обязательна нумерация страниц.

**3.** Порядок оформления статьи (см. макет статьи на Internet-сайте журнала):

— индекс УДК;

— инициалы, фамилии авторов;

— название статьи;

— аннотация (объемом до 0,3 страницы текста);

— ключевые слова;

— текст статьи;

— библиографический список не более четырех ссылок (при большем количестве их следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5–2008);

— сведения об авторах: ***фамилии, имена, отчества (полностью), ученые степени, звания*** (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и ***английском языках***;

— почтовые адреса, телефоны и ***e-mail авторов;***

***— название статьи на английском языке;***

***— аннотацию на английском языке;***

***— ключевые слова на английском языке;***

***— библиографический список на английском языке.***

**4.** На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

**5.** Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением *.cdr (предпочтительно) или *.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. Иллюстрации, в том числе фотографии, должны быть черно-белыми с хорошей проработкой деталей.

Рисунки должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (внести изменения, исправления, т.е. изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки).

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, с подписями к ним. Размер иллюстрации не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

**6.** Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

**7.** Формулы следует набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набирать курсивом. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др., а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и 1 (цифра), *n* и п, *I* и *J* и т.п.) пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).

---

[1] С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

[2] На 2012 г. — из расчета 650 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

**8.** Следует применять физические величины, обозначения и единицы измерения в системе СИ(SI).

**9.** В библиографический список включаются только те работы, которые опубликованы в печати, составленные в соответствии с ГОСТ 7.80–2000, ГОСТ 7.1–03.

Примеры оформления можно найти на Internet-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу www.sibstrin.ru и www.izvuzstr.sibstrin.ru

**10.** Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции. Материалы уже публиковавшихся работ к рассмотрению не принимаются.

**11.** Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указываются ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка «рукопись после доработки». Доработанную статью необходимо присылать в двух экземплярах с приложением ее записи *в электронном виде*. К доработанной рукописи обязательно прикладывать ответы на все замечания рецензента. Датой поступления статьи считается получение редакцией ее окончательного текста.

**12.** Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются. Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста рукописей. *Корректура статей авторам не представляется.*

**13.** *Гонорар* за опубликованные статьи *не выплачивается.*

**14. Рукописи, не удовлетворяющие изложенным требованиям, отправляются авторам на доработку, что замедляет срок их опубликования.**


ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА

**на 1-е полугодие 2012 г.**

**НА НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ**

**ИЗВЕСТИЯ**
**ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**

**«СТРОИТЕЛЬСТВО»**

**Журнал имеет разделы**

**Строительные конструкции**
**Теория инженерных сооружений**
**Строительные материалы и изделия**
**Экономика и организация строительства**
**Автоматизация и технология строительного производства**
**Гидротехническое строительство**
**Санитарная техника**
**Строительство автомобильных дорог и мостов**
**Строительные и дорожные машины**
**Научные проблемы архитектуры и экологии**
**Научно-методический**
**В лабораториях вузов**
**Внедрение научных достижений в производство**
**Научная информация**

**Каталожная цена за 6 месяцев — 1440 р.**

**Цена отдельного номера — 240 р.**

**Подписка принимается с любого месяца без ограничения всеми агентствами Роспечати и отделениями связи. Индекс 70377.**


**ISSN 0536—1052. Известия вузов. Строительство. 2012. № 4 (640). 1–132**

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов**
**СТРОИТЕЛЬСТВО**

**№ 4 (640) 2012**

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина*, *Т.П. Петроченко*
Технический редактор *Н.М. Макаренко*
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*
Корректор *Г.И. Шведкина*