

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ РФ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ  
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ  
**СТРОИТЕЛЬСТВО**

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

№ 11 (635)  
Ноябрь 2011 г.

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. Правдинец, В.Г. Себе-  
шев, 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](http://www.sibstrin.ru) E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 28.12.11. Формат 70×108 1/16.  
Усл. печ. л. 11,20+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 888.

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

- Захаров А.В., Пономарев А.Б. Исследования работы энергетических фундаментов ..... 3

### ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

- Мищенко А.В., Немировский Ю.В. Динамика слоистых рам из разносопротивляющихся материалов ..... 10

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

- Машкин Н.А., Себелев И.М., Каткова Т.Ф., Шарапин Ю.А. Дисперсионно-армированый керамический кирпич из пылеватых суглинков ..... 21

- Раков М.А., Бердов Г.И., Ильина Л.В., Никоненко Н.И. Влияние механической активации минеральных добавок на прочность цементного камня .. 27

- Денисов Д.Ю., Абдрахимов В.З. К вопросу использования жидкостекольных композиций в производстве теплоизоляционных материалов ..... 32

### ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

### АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

- Авдеев В.П., Кононов А.Д., Кононов А.А., Варда-

<b>НЯН Н.А.</b> Техническая реализация поляризационного измерителя некоторых физико-механических свойств разрабатываемого грунта для системы автоматического управления рабочими процессами землеройно-транспортных машин .....	38
<b>Иванчура В.И., Прокопьев А.П., Емельянов Р.Т., Поляков Т.Н.</b> Модель системы автоматического управления дорожного катка на основе нечеткой логики	45
<b>САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА</b>	
<b>Рафальская Т.А.</b> Особенности совместной работы систем отопления и горячего водоснабжения при высоких температурах наружного воздуха .....	54
<b>СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ</b>	
<b>Щербаков В.В., Барсук М.Н.</b> Технология и приборы для определения ровности автомобильных дорог .....	63
<b>СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ</b>	
<b>Ломухин В.Б., Виноградов А.Б., Лаптева И.В., Сургин В.В.</b> Гипотеза о механизме действия ремонтно-восстановительных составов на строительные машины и составляющих их узлы .....	71
<b>Мельникова А.С., Дедов А.С., Грузин А.В., Абраменков Д.Э.</b> Развитие конструкций молотов для погружения свай в грунтовые среды: исторический аспект .....	75
<b>НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ</b>	
<b>Петров Д.Г., Царёв В.И.</b> Прогнозы развития городов Центральной Сибири в конце XIX в. ....	79
<b>Ямалетдинов С.Ф.</b> Параллельное градостроительство: организация проектирования закрытых городов атомной промышленности .....	85
<b>НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ</b>	
<b>Локтионов А.П.</b> Полиномиальная аппроксимация в экспериментально-расчетном методе оценки состояния конструктивного элемента .....	93
<b>Рахимбаев Ш.М., Толыпина Н.М., Балес А.А.</b> Обоснование оптимальных условий ускоренных испытаний на внутреннюю коррозию .....	101
<b>Пантелеев Н.Н., Безгеммер Д.А.</b> Исследование напряженно-деформированного состояния цилиндрических зданий при температурных воздействиях .....	105
<b>Себешев В.Г.</b> Комплексная оценка надежности конструкций с регулируемыми параметрами напряженно-деформированного состояния .....	113
<b>В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ</b>	
<b>Гришин Д.В.</b> Осадки штампа при изменении размеров области армирования песчаного основания .....	122

**УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!**

**Обращаем Ваше внимание на дополнения в п. 3 Правил подготовки рукописи. В авторской справке следует указать фамилии, имена, отчества полностью всех авторов на русском и английском языках.**

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.159

А.В. ЗАХАРОВ, А.Б. ПОНОМАРЕВ

### ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ФУНДАМЕНТОВ

Приведены результаты исследования работы различных типов энергетических фундаментов и зависимости получаемой тепловой энергии от основных характеристик фундаментов и геологических условий.

Ключевые слова: геотермальная энергия, тепловая энергия грунта, энергетический фундамент.

Одно из направлений повышения эффективности энергопотребления при отоплении зданий — использование возобновляемых (альтернативных) источников. В развитых странах значительную долю потребляемой энергии на отопление составляет тепловая энергия грунта. Несмотря на продолжительность исследований данного вопроса, базирующиеся на них технологии сравнительно молоды. В настоящее время данные технологии широко применяют во многих странах, таких как Канада, Австралия, США, большинство европейских стран.

Энергетические геотермальные системы имеют большой ряд преимуществ:

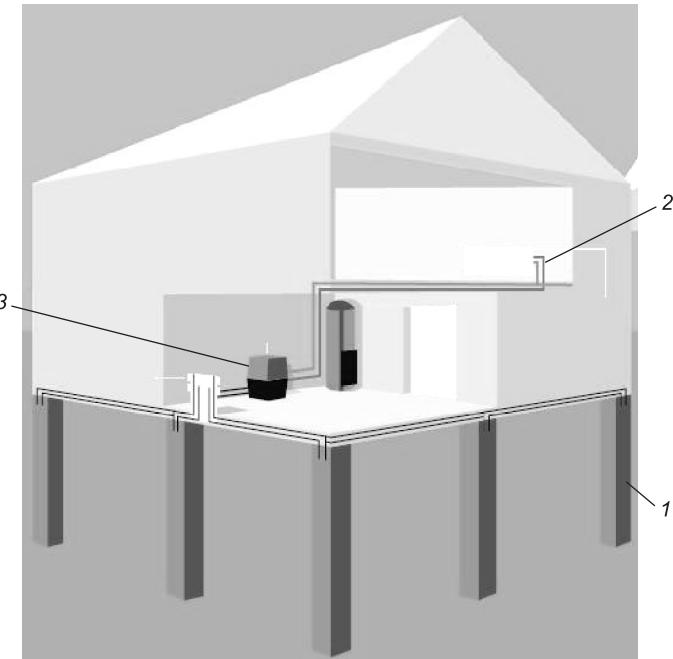
- обеспечивают снижение расхода электроэнергии для отопления зданий до 50–70 %;
- позволяют использовать фундаменты здания, необходимые с конструкционной точки зрения, в качестве грунтовых теплообменников;
- имеют меньшие текущие расходы в процессе эксплуатации.

В России технологии, использующие геотермальную энергию, на сегодняшний день применяются крайне редко. Учитывая положительные стороны данных систем и государственную политику в области энергосбережения, вопрос об исследовании тепловой энергии грунта при устройстве фундаментов и подземных сооружений, по нашему мнению, является актуальным.

Цель проводимых исследований — изучение взаимодействия энергетических фундаментов с грунтовым массивом и разработка отечественной методики по их проектированию.

Система отопления с использованием тепловой энергии грунта состоит из трех основных частей (рис. 1): системы трубопроводов, погруженных в грунтовый массив или контактирующих с грунтом (первичный контур); системы трубопроводов, предназначенных для отопления или кондиционирования (вторичный контур) и теплового насоса, объединяющего эти системы трубопроводов [1, 2].

Первичный контур служит для получения тепловой энергии грунта и располагается в теле энергетических фундаментов. В качестве энергети-



*Рис. 1. Принципиальная схема систем отопления с использованием тепловой энергии грунта*

1 — энергетические фундаменты; 2 — система отопления здания;  
3 — тепловой насос

ческих фундаментов могут использоваться сваи, фундаментные плиты, «стена в грунте», диафрагмы, анкера, стены подземных этажей и другие конструкции, контактирующие с грунтом. Важное преимущество энергетических фундаментов заключается в том, что данные конструкции (сваи, фундаментные плиты и т.д.) необходимы зданию исходя из условий его конструкционной безопасности (для обеспечения несущей способности и деформативности). Соответственно, нет потребности в их дополнительном возведении. Поэтому энергетические фундаменты являются конструкциями двойного назначения, играя роль несущих элементов и роль грунтовых теплообменников. Вторичный контур — замкнутая система отопления в стенах и перекрытиях здания. Функции теплового насоса заключаются в том, чтобы повысить температуру теплоносителя из первичного контура до необходимой.

Как известно, грунт — это многофазная система со сложным механизмом теплопередачи, который включает в себя [1]: проводимость, конвективную передачу (конвекцию), процессы испарения и конденсации (скрытую теплопередачу), теплоизлучение, ионный обмен, процессы замерзания — оттаивания.

Если размеры частиц грунта и пор существенно малы по отношению к рассматриваемому объему грунта, то комплексный процесс теплопередачи в грунте можно свести только к *проводимости*, которая преобладает в случае использования энергетических фундаментов.

Если в рассматриваемом объеме грунта есть внутренний источник тепла (внутреннее теплообразование), то основное уравнение теплопроводности имеет следующий вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 t + \frac{q_v}{pc}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплопроводности;

$\nabla^2 t$  — оператор Лапласа;

$q_v$  — мощность внутренних источников теплоты;

$c$  — удельная теплоемкость;

$\rho$  — плотность твердой среды.

Дифференциальные уравнения теплопроводности отображают общий характер процесса и имеют множество решений. Для получения решения конкретной задачи необходимо задание начальных и граничных условий. Из-за математических трудностей аналитические решения этих уравнений возможны только для простых случаев. В настоящее время разработан ряд программных комплексов, позволяющих анализировать задачи теплопереноса в грунтах, в том числе расчеты энергетических фундаментов.

Для определения распределения температуры в грунтовом массиве, изменения уровня грунтовых вод, физико-механических и теплофизических характеристик грунтового массива были выполнены полевые исследования грунтов на специально выбранной экспериментальной площадке. В результате проведенных изысканий установлено инженерно-геологическое строение площадки. В геологическом отношении экспериментальная площадка сложена четвертичными аллювиально-делювиальными глинистыми грунтами общей толщиной 11,6 м, подстилаемыми галечником и перекрытыми толщей насыпных грунтов мощностью 6,0 м. Коренными породами являются аргиллиты, вскрытые на глубине 17,6 м.

По данным лабораторных исследований получены следующие физико-механические и теплофизические характеристики грунтов экспериментальной площадки:

— ИГЭ-1 (инженерно-геологический элемент). Насыпные грунты:  $\rho = 1,91 \text{ т}/\text{м}^3$ ,  $\rho_s = 2,75 \text{ т}/\text{м}^3$ ,  $\rho_d = 1,58 \text{ т}/\text{м}^3$ ,  $\rho_{sb} = 1,00 \text{ т}/\text{м}^3$ ,  $\omega = 0,25$ ,  $\omega_L = 0,33$ ,  $\omega_P = 0,16$ ,  $e = 0,73$ ,  $c = 1,27 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ,  $\lambda = 1,33 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ .

— ИГЭ-2. Глина тугопластичная:  $\rho = 1,92 \text{ т}/\text{м}^3$ ,  $\rho_s = 2,72 \text{ т}/\text{м}^3$ ,  $\rho_d = 1,53 \text{ т}/\text{м}^3$ ,  $\rho_{sb} = 0,98 \text{ т}/\text{м}^3$ ,  $\omega = 0,22$ ,  $\omega_L = 0,36$ ,  $\omega_P = 0,17$ ,  $e = 0,8$ ,  $E_{ok} = 2,46 \text{ МПа}$ ,  $c = 0,05 \text{ МПа}$ ,  $\phi = 22,6^\circ$ ,  $c = 1,25 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ,  $\lambda = 1,21 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ .

— ИГЭ-3. Галечниковый грунт с содержанием гравия и гальки до 60...70 % и заполнителем из твердой супеси:  $\rho = 1,69 \text{ т}/\text{м}^3$ ,  $\rho_s = 2,63 \text{ т}/\text{м}^3$ ,  $\rho_d = 1,68 \text{ т}/\text{м}^3$ ,  $\rho_{sb} = 1,04 \text{ т}/\text{м}^3$ ,  $\omega = 0,007$ ,  $\omega_L = 0,025$ ,  $\omega_P = 0,01$ ,  $c = 0,85 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ,  $\lambda = 0,41 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ .

— ИГЭ-4. Аргиллит сильновыветрелый, сильнотрециноватый, насыщенный водой:  $\rho = 2,27 \text{ т}/\text{м}^3$ ,  $\rho_s = 2,71 \text{ т}/\text{м}^3$ ,  $\rho_d = 2,08 \text{ т}/\text{м}^3$ ,  $\rho_{sb} = 1,31 \text{ т}/\text{м}^3$ ,  $\omega = 0,1$ ,  $\omega_L = 0,34$ ,  $\omega_P = 0,17$ ,  $e = 0,31$ ,  $E_{ok} = 7,36 \text{ МПа}$ ,  $c = 0,06 \text{ МПа}$ ,  $\phi = 45,91^\circ$ ,  $c = 1,07 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ,  $\lambda = 0,59 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ .

В результате мониторинга получены диаграммы распределения температуры в грунте по глубине и ее сезонные колебания (рис. 2). Колебания температуры в грунтовом массиве незначительны, начиная с глубины 6,0 м. Максимальное отклонение от средней температуры не превышает 0,24°. Температура грунтового массива глубже 6,0 м составляет от 13 до 10 °C, постепенно уменьшаясь с глубиной, причем до глубины 12,0 м — 12 °C, с 10 до 16 м — 11 °C, с глубины 16 м — 10 °C. По наблюдениям за уровнем грунтовых вод установлено, что среднегодовой уровень составляет 2,55 м. Колебания уровня грунтовых вод во времени незначительны.

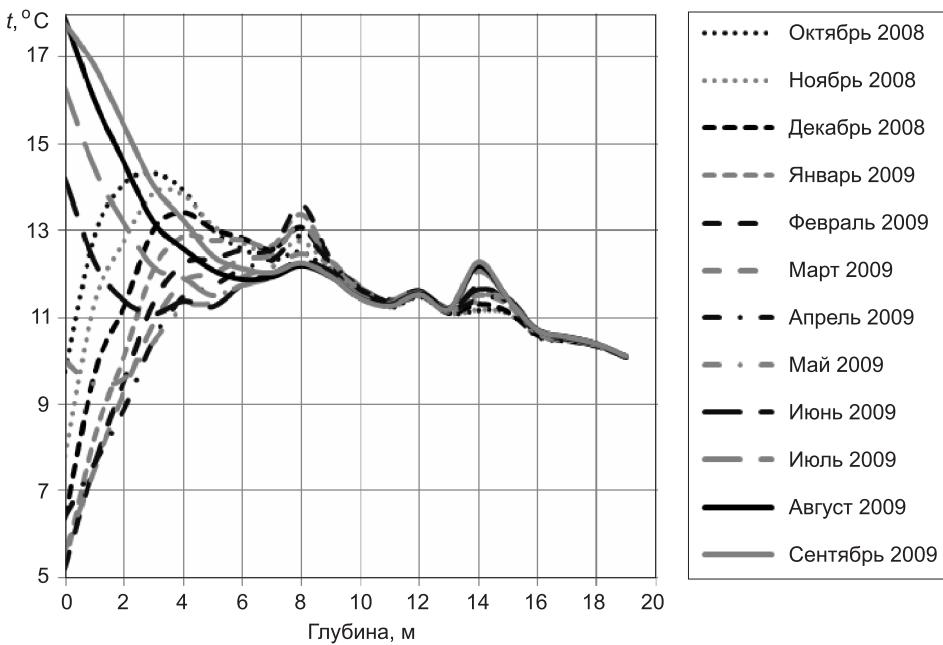


Рис. 2. График распределения температуры в грунтовом массиве по глубине

Для проведения численного моделирования был выбран программный комплекс GeoStudio, базовым дифференциальным уравнением которого является основное уравнение теплопроводности с внутренним источником тепла (1).

Предварительно решались тестовые задачи для трех основных типов подземных конструкций заглубленной части здания, контактирующих с грунтом:

- одиночной сваи диаметром 1,2 м длиной 20 м;
- плитного фундамента шириной 24 м с глубиной заложения 20 м;
- «стены в грунте» глубиной 20 м.

В качестве начальных условий задавалась температура в каждом узле в начальный период времени. Граничные условия назначались для поверхности грунта и для нижней границы численной модели. Граничные условия на нижней границе были заданы постоянной во времени величиной плотности теплового потока. Граничные условия для поверхности задавались путем приложения к ней климатических характеристик г. Перми за 2009 г.

Временные параметры моделирования (количество годовых циклов) принимались исходя из условия установления «нового» температурного режима грунтового массива с учетом отбираемой тепловой энергии. Дополнительно назначались граничные условия на поверхности конструкций, расположенной ниже уровня промерзания грунта, в виде постоянной во времени температуры  $+1^{\circ}\text{C}$ . Тем самым моделировался максимальный отбор тепловой энергии через поверхность контакта конструкций с грунтом.

Для определения минимальных временных параметров проведения численного моделирования для различных типов фундаментов были выполнены расчеты и получены величины плотности теплового потока через поверхность контакта грунта с фундаментами за несколько календарных лет. На рис. 3 приведены значения средней плотности теплового потока за отопительный период. На основании решения тестовых

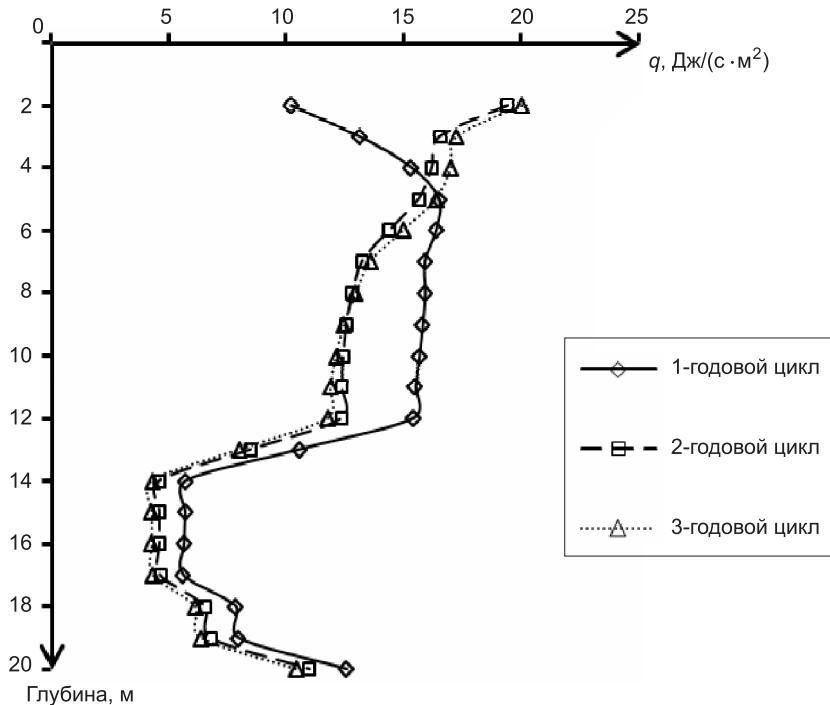


Рис. 3. График средней плотности теплового потока за время отопительного периода через поверхность контакта грунта со сваей длиной 20 м

задач определены минимальные временные параметры проведения численного моделирования работы различных типов энергетических фундаментов. Для одиночной энергетической сваи они составили 3 года, плитного фундамента — 7 лет, «стены в грунте» — 5 лет соответственно.

Целью выполнения численного моделирования была количественная оценка получаемой тепловой энергии от энергетических фундаментов различного типа. Она проводилась на примере реальных грунтовых условий г. Перми. Для этого были выявлены основные типы характерных грунтовых оснований и для них проведены численные эксперименты, на основе которых получены уравнения регрессии.

Согласно проведенным исследованиям [3] рассмотрено два типа инженерно-геологических условий. Первый основной тип представлен суглинком тугопластичным и гравийным грунтом с песчаным заполнителем. Второй тип — песок средней крупности, ниже которого залегает гравийный грунт с песчаным заполнителем. Ниже гравийного грунта залегают малосжимаемые полускальные породы верхнепермских отложений. Экспериментальная площадка относилась к первому типу грунтового основания. При выполнении численного эксперимента определялись зависимости средней плотности теплового потока через поверхность контакта заглубленных конструкций здания с грунтом от различных факторов.

Поскольку были рассмотрены два типа грунтовых условий с конкретными значениями физических и теплофизических характеристик грунтов, то их влияние на работу энергетических фундаментов учитывалось путем проведения численных расчетов и получения зависимости для каждого из них.

Основными факторами были выбраны геометрические размеры и величина заложения подземных конструкций, а именно:

- для одиночной сваи: радиус сваи ( $r$ ) и глубина погружения острия сваи ( $d$ );

- для плитного заглубленного фундамента: ширина фундамента ( $b$ ) и глубина заложения его подошвы ( $d$ );

- для фундамента по схеме «стены в грунте»: величина заложения ( $d$ ).

По результатам численного моделирования получены следующие регрессионные зависимости:

- для одиночной сваи

$$\bar{q}_1 = 86,57 - 205,43r - 1,11d + 157,00r^2 - 0,011d^2 + 1,45rd, \quad (2)$$

$$\bar{q}_2 = 85,64 - 219,35r - 0,04d + 173,30r^2 - 0,047d^2 + 1,11rd; \quad (3)$$

- для заглубленного плитного фундамента

$$\bar{q}_1 = 8,96 - 0,43b - 0,41d + 0,0077b^2 + 0,0061d^2 + 0,0082bd, \quad (4)$$

$$\bar{q}_2 = 9,05 - 0,46b - 0,31d + 0,0082b^2 + 0,0017d^2 + 0,0080bd; \quad (5)$$

- для фундамента по схеме «стена в грунте»

$$\bar{q}_1 = 7,446 - 0,496d + 0,011d^2, \quad (6)$$

$$\bar{q}_2 = 7,27 - 0,43d + 0,0091d^2, \quad (7)$$

где  $\bar{q}_1$  и  $\bar{q}_2$  — плотность теплового потока через поверхность контакта фундаментов различного типа с грунтом 1-го и 2-го типов рассмотренных инженерно-геологических условий.

По полученным зависимостям были построены номограммы. Пример номограмм, построенных для одиночной сваи, приведен на рис. 4.

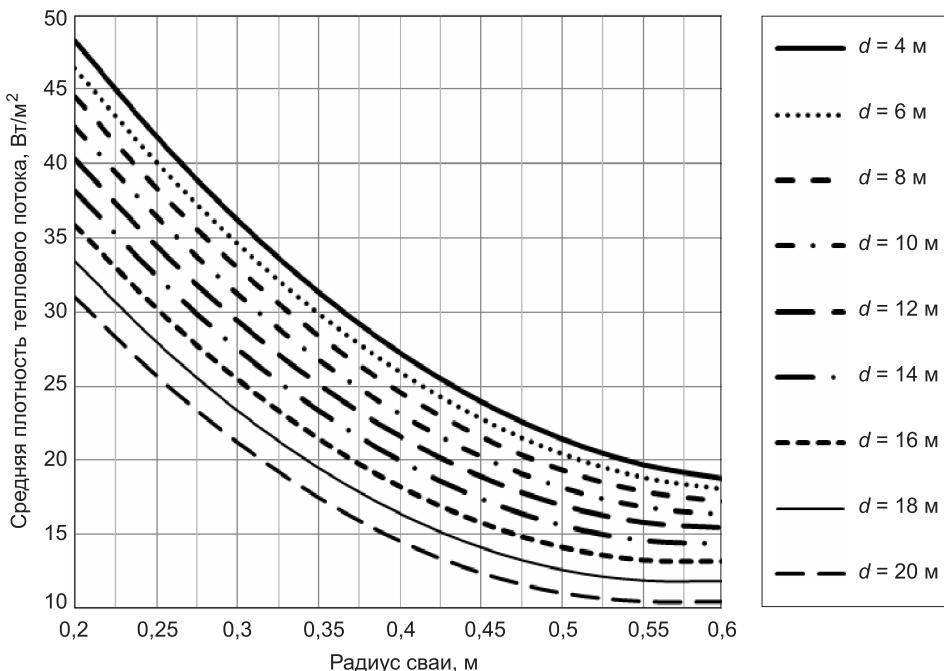


Рис. 4. Номограмма зависимости плотности теплового потока ( $\bar{q}$ ) через поверхность контакта сваи с грунтом от радиуса ( $r$ ) и глубины заложения острия ( $d$ ) сваи. 1-й тип инженерно-геологических условий

**Выводы.** На основе анализа полученных уравнений регрессии и построенных номограмм следует:

1. Плотность теплового потока ( $\bar{q}$ ) через поверхность контакта энергетического фундамента будет зависеть:

— для одиночной сваи от ее радиуса ( $r$ ) и глубины погружения ( $d$ ); при этом плотность теплового потока уменьшается с увеличением радиуса и длины сваи;

— для заглубленного плитного фундамента от его ширины ( $b$ ) и глубины заложения подошвы ( $d$ ); при этом плотность теплового потока уменьшается с увеличением ширины и глубины заложения фундамента;

— для фундамента «стена в грунте» от глубины заложения ( $d$ ); при этом плотность теплового потока уменьшается с увеличением величины глубины заложения «стены в грунте».

2. Величина плотности теплового потока для 2-го типа рассмотренных инженерно-геологических условий выше, чем для 1-го типа: для одиночной сваи на  $\approx 10\%$ ; для плитного фундамента и фундамента по схеме «стена в грунте» на  $\approx 6\%$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аметистов, Е.В. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник [Текст] / Е.В. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Е. Емцев и др. ; под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. — М. : Энергоиздат, 1982. — 512 с.
2. Сборник трудов международной конференции (ASSMGT) «TAGUNGBEITÄGE» [Текст], 18-19 января 2007 г.
3. Пономарев, А.Б. Об инженерно-геологических условиях строительства г. Перми [Текст] / А.Б. Пономарев, С.В. Калошина // Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях: Тр. междунар. науч.-техн. конф., посв. 50-летию BashNIIstroya. В 3 т. — Уфа, 2006. — Т. 2.

ЗАХАРОВ А.В., ст. препод.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
ПОНОМАРЕВ А.Б., д-р техн. наук, проф.

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Получено после доработки 12.10.11

**Zaharov A.V.**, senior lecturer; State national research polytechnic university of Perm, Russia

**Ponomarev A.B.**, doctor of technical sciences, professor; State national research polytechnic university of Perm, Russia

#### INVESTIGATIONS OF ENERGY FOUNDATION BEHAVIOUR

Results of exploratory works of various types of the energy foundations, dependences of received thermal energy on the basic characteristics of the foundations and geological conditions.

Key words: geothermal energy, ground thermal energy, the energy foundation.

#### REFERENCES

1. Ametistov, E.V. Heat- and mass exchange. Teplotekhnichesky Experiment : Manual [Text] / E.V. Ametistov, V.A. Grigorev, B.E. Emtcev ; under edition V.A. Grigorev and V.M. Zorin. — M. : Energoizdat, 1982. — 512 p.
2. Articles of the international conference (ASSMGT) «TAGUNGBEITÄGE» [Text], 18-19 January, 2007.
3. Ponomarev, A.B. About engineering-geological conditions of building of Perm [Text]/ A.B. Ponomarev, S.V. Kaloshina // The problems of soil mechanics and foundations in difficult soil conditions: Proc. of the international sci.-techn. conf. devoted to the fiftieth anniversary BashNIIstroy. — Ufa, 2006. — Vol. 2.

# ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 624.072.016

А.В. МИЩЕНКО, Ю.В. НЕМИРОВСКИЙ

## ДИНАМИКА СЛОИСТЫХ РАМ ИЗ РАЗНОСОПРОТИВЛЯЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ\*

Для динамически нагруженных слоисто-неоднородных плоских рам, выполненных из вязкоупругих разносопротивляющихся материалов, рассмотрено применение модели разномодульного деформирования.

Ключевые слова: слоистая рама, динамические нагрузки, разномодульность.

Многие конструкционные материалы, такие как бетоны, древесина, пластмассы, некоторые металлические сплавы и др., в исходном или модифицированном состоянии характеризуются нелинейностью деформирования в сочетании с разносопротивляемостью при растяжении и сжатии. Учет данных факторов для неоднородных систем в динамических задачах приводит к существенному усложнению расчетов. В этой ситуации весьма актуальной задачей является задача разработки упрощенных теорий, с одной стороны так или иначе учитывающих указанные свойства нелинейного деформирования, а с другой — обеспечивающих приемлемую трудоемкость и удовлетворительную точность принятой расчетной методики.

Основная позиция, на которой базируется разрабатываемая расчетная модель, основана на гипотезе разномодульности деформирования материалов. При этом реальные нелинейные диаграммы  $\sigma - \varepsilon$  на ограниченных расчетных участках представляются линейными законами в пределах одного знака деформации. Указанная аппроксимация при сравнительно малой трудоемкости хорошо описывает деформирование конструкционных материалов в ограниченном диапазоне при эксплуатационных нагрузках. Подобный подход широко применяется в задачах статического деформирования однородных конструкций [2–4]. Известен также ряд работ, посвященных динамике однородных стержней и пластин [5], в которых, как правило, использовались осредненные физические константы. Для задач динамического деформирования неоднородных конструкций такие расчетные модели не использовались.

**1. Соотношения для слоистого стержня.** В местной системе координат  $xyz$ , связанной с  $s$ -слойным стержнем, ось  $x$  совмещена с продольной геометрической осью стержня, а  $y$  расположена в плоскости изгиба, являющейся одновременно и плоскостью симметрии стержня. Однородный материал  $k$ -го слоя ( $k = 1, \dots, s$ ) характеризуется объемной плотностью  $\rho_k$ , модулями упругости  $E_k^+$ ,  $E_k^-$  при растяжении и сжатии, ко-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки РФ, номер проекта 2.1.2/4822.

эффициентами вязкости  $\eta_k^+$ ,  $\eta_k^-$  при положительной и отрицательной скорости деформации. В нормальном к оси  $x$  сечении слои имеют переменные размеры: ширину  $b_k(x, y)$  в направлении оси  $z$  и высоту  $h_k(x)$  в направлении  $y$ .

Основные соотношения построим на основе гипотез Бернулли–Эйлера и закона вязкоупругого деформирования. В момент времени  $t$  для перемещений точек оси  $u$ ,  $v$ , углов поворота  $\theta$ , деформаций  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ , сдвигов  $\gamma_{yx}$  и напряжений  $\sigma_x^{(k)}$  в  $k$ -м слое запишем

$$\varepsilon_x(x, y, t) = \varepsilon_0(x, t) - \kappa(x, t) \cdot y, \quad \varepsilon_y(x, y, t) = 0, \quad \gamma_{yx}(x, y, t) = 0, \quad (1)$$

$$\varepsilon_0(x, t) = u'(x, t), \quad \kappa(x, t) = \theta'(x, t), \quad \theta(x, t) = v'(x, t),$$

$$\sigma_x^{(k)}(x, y, t) = E_k^\pm \varepsilon_x(x, y, t) + \eta_k^\pm \dot{\varepsilon}_x(x, y, t), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_0$ ,  $\kappa$  — деформация и кривизна оси стержня; штрихом обозначено дифференцирование по координате  $x$ , а точкой — по времени.

Уравнения движения гибкого стержня для интегральных силовых факторов  $N(x, t)$ ,  $Q(x, t)$ ,  $M(x, t)$  при воздействии динамических нагрузок  $q_x(x, t)$ ,  $q_y(x, t)$ ,  $m_z(x, t)$  с учетом гипотез (1) принимают вид

$$\begin{cases} N' + q_x = m_A \ddot{u} - m_S \ddot{\theta}, \\ Q' - (N\theta)' - q_y = -m_A \ddot{v}, \\ M' - Q - m_z = m_I \ddot{\theta} - m_S \ddot{u}, \end{cases} \quad (3)$$

а нелинейные физические соотношения, записанные на основе (2), —

$$\begin{cases} D_A \varepsilon_0 - D_S \kappa + V_A \dot{\varepsilon}_0 - V_S \dot{\kappa} = N, \\ -D_S \varepsilon_0 + D_I \kappa - V_S \dot{\varepsilon}_0 + V_I \dot{\kappa} = M. \end{cases} \quad (4)$$

В уравнениях системы (3) в предположении о действии больших продольных сил учтено нелинейное слагаемое  $(N\theta)'$ , а  $(Q\theta)'$  — игнорировано. В (3), (4) применены три группы обобщенных интегральных характеристик слоистого стержня: массовые  $m_\Omega(x)$ , жесткостные  $D_\Omega(x, \varepsilon)$  и вязкостные  $V_\Omega(x, \dot{\varepsilon})$ , ( $\Omega \in [A, S, I]$ ), заданные выражениями:

$$[m_A, m_S, m_I](x) = \sum_{k=1}^s \rho_k \iint_{A_k} [1, y, y^2] dA, \quad (5)$$

$$[D_A, D_S, D_I](x, \varepsilon) = \sum_k E_k^\pm \iint_{A_k} [1, y, y^2] dA, \quad (6)$$

$$[V_A, V_S, V_I](x, \dot{\varepsilon}) = \sum_k \eta_k^\pm \iint_{A_k} [1, y, y^2] dA, \quad (7)$$

где  $A_k$  — площадь поперечного сечения  $k$ -го слоя.

При динамическом деформировании граница зон растяжения и сжатия в многослойном стержне изменяется по пространству и времени, что обуславливает нелинейность физических соотношений: исходного (2) и интегрального (4). Квазилинейные уравнения (4) имеют переменные функциональные коэффициенты (6), (7). При вычислении сумм в (6) и (7) с целью идентификации физических характеристик разносопротивляющихся материалов используется информация о знаках деформации  $\varepsilon(x, y, t)$  и скорости деформации  $\dot{\varepsilon}(x, y, t)$ . В случае смены знака деформа-

ции (или ее скорости) в пределах поперечного сечения исходное число слагаемых, равное  $s$ , в (6) (или соответственно в (7)) увеличивается на единицу.

Объединив (3), (4), получим относительно искомых перемещений систему двух нелинейных дифференциальных уравнений с переменными по пространству и времени коэффициентами

$$\begin{cases} (D_A u' - D_S v'' + V_A \dot{u}' - V_S \dot{v}'')' - m_A \ddot{u} + m_S \ddot{v}' = -q_x(x, t), \\ (D_I v'' - D_S u' + V_I \dot{v}'' - V_S \dot{u}'')'' - (N v')' + m_A \dot{u} - (m_I \dot{v}' - m_S \dot{u})' = \\ = m_z'(x, t) + q_y(x, t) \end{cases} \quad (8)$$

при удовлетворении соответствующих начальных и граничных условий.

**2. Соотношения для плоской слоисто-неоднородной рамной системы.** Рама произвольной структуры содержит  $n$  описанных выше слоисто-неоднородных стержней из разносопротивляющихся материалов, соединенных между собой в  $m$  жестких или шарнирных узлах. Сформируем следующие векторы:  $\mathbf{F}(t)$  и  $\mathbf{W}(t)$  — узловых динамических нагрузок и перемещений в глобальной системе  $XYZ$ ,  $\mathbf{S}(t)$  и  $\mathbf{L}(t)$  — обобщенных концевых усилий и деформаций стержней рамы (индексы:  $b$  — *begin*,  $e$  — *end*)

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(t) &= [\mathbf{F}_1 \dots \mathbf{F}_i \dots \mathbf{F}_m]^T, & \mathbf{F}_i(t) &= [F_X F_Y m]_i^T, \\ \mathbf{W}(t) &= [\mathbf{w}_1 \dots \mathbf{w}_i \dots \mathbf{w}_m]^T, & \mathbf{w}_i(t) &= [w_X w_Y w_\phi]_i^T, \\ \mathbf{S}(t) &= [\mathbf{S}_1 \dots \mathbf{S}_j \dots \mathbf{S}_n]^T, & \mathbf{S}_j(t) &= [NM_b M_e]_j^T, \\ \mathbf{L}(t) &= [\mathbf{L}_1 \dots \mathbf{L}_j \dots \mathbf{L}_n]^T, & \mathbf{L}_j(t) &= [\Delta l \theta_b \theta_e]_j^T. \end{aligned}$$

Условия динамического равновесия рамной системы при учете больших перемещений и углов поворота представим в виде

$$\mathbf{A}_s(\mathbf{W})\mathbf{S}(t) + \mathbf{F}(t) + \mathbf{F}_d(t) = 0, \quad (9)$$

где  $\mathbf{F}_d(t)$  — вектор узловых инерционных нагрузок;

$\mathbf{A}_s(\mathbf{W})$  — зависящая от перемещений  $\mathbf{W}(t)$  матрица преобразования силового базиса  $\mathbf{S} \rightarrow \mathbf{F}$  — формируется из матриц преобразования отдельных гибких стержней.

Для  $j$ -го стержня она имеет вид

$$\mathbf{a}_{s_j}(\alpha_j) = \left[ \begin{array}{c} \mathbf{a}_s^b \\ \mathbf{a}_s^e \end{array} \right]_j = \left[ \begin{array}{ccc|c} c - \alpha s & -(s + \alpha c)/l & (s + \alpha c)/l & \\ \hline s + \alpha c & (c - \alpha s)/l & -(c - \alpha s)/l & \\ \hline 0 & 1 & 0 & \\ \hline -c + \alpha s & (s + \alpha c)/l & -(s + \alpha c)/l & \\ -s - \alpha c & -(c - \alpha s)/l & (c - \alpha s)/l & \\ \hline 0 & 0 & -1 & \end{array} \right]_j \quad (10)$$

$j = 1, \dots, n$ ;  $c = \cos\varphi$ ,  $s = \sin\varphi$ ,  $\varphi$  — исходный угол, образованный осью стержня с осью  $X$  общей системы координат;

$\alpha_j(t) = (v_e - v_b)/l$  — угол поворота хорды, стягивающей концы стержня в деформированном состоянии;

$v_b$ ,  $v_e$  — поперечные перемещения начала и конца стержня.

При  $\alpha = 0$  из (10) имеем матрицу линейного преобразования.

Для определения вектора инерционных нагрузок  $\mathbf{F}_d(t)$  рассмотрим отдельный стержень с шестью степенями свободы по направлению обобщенных концевых перемещений

$$\mathbf{W}_{xy}(t) = [w_i(t)] = [u_b v_b \theta_b u_e v_e \theta_e]^T. \quad (11)$$

Функции динамических поперечных и продольных перемещений аппроксимируем разложениями

$$v(x, t) = \sum_{i=1}^6 f_{vi}(x) w_i(t), \quad u(x, t) = \sum_{i=1}^6 f_{ui}(x) w_i(t), \quad (12)$$

в которых координатные функции отражают формы поперечных и продольных перемещений в шести базисных состояниях (11). Примем для них статические перемещения в однородном стержне постоянного сечения от концевых смещений  $w_i = 1$  ( $i = 1, \dots, 6$ ). Для шести из них получим

$$\begin{aligned} f_{u1} &= 1 - \bar{x}, \quad f_{u4} = \bar{x}, \quad \bar{x} = x/l, \\ f_{v2} &= 1 - 3\bar{x}^2 + 2\bar{x}^3, \quad f_{v3} = l\bar{x}(1 - 2\bar{x} + \bar{x}^2), \\ f_{v5} &= \bar{x}^2(3 - 2\bar{x}), \quad f_{v6} = l\bar{x}^2(\bar{x} - 1). \end{aligned} \quad (13)$$

Остальные шесть функций, отражающие связанность продольных и поперечных перемещений, получим на основе первого уравнения (8), которое в статике дает

$$(D_A u')' = (D_S v'')'. \quad (14)$$

Заменив жесткости  $D_A$ ,  $D_S$  на эквивалентные постоянные, получим

$$\begin{aligned} f_{ui} &= \frac{D_S^0}{D_A^0} f'_{vi} + c_{u1}x + c_{u0}, \quad f_{vi} = \frac{D_A^0}{D_S^0} \int f_{ui} dx + c_{v2}x^2 + c_{v1}x + c_{v0}, \\ D_\Omega^{(0)} &= l^{-1} \int D_\Omega(x) dx, \quad \Omega \in [A, S]. \end{aligned} \quad (15)$$

Для 1 и 4 состояний на основе второго выражения (15) при удовлетворении граничных условий  $v(0) = v(l) = 0$ ,  $v'(0) = v'(l) = 0$  имеем  $f_{v1} = 0$ ,  $f_{v4} = 0$ . Для 2, 3, 5, 6 состояний при условиях  $u(0) = u(l) = 0$  получим функции продольных перемещений

$$f_{u2} = -f_{u5} = \frac{6D_S^0}{lD_A^0} \varphi(x), \quad f_{u3} = f_{u6} = \frac{3D_S^0}{D_A^0} \varphi(x), \quad \varphi(x) = \bar{x}(\bar{x} - 1).$$

Аналогичные выкладки могут быть проделаны для стержней с другими граничными условиями.

Пусть в промежуточных сечениях  $x = x_k$  стержень несет нецентрированные сосредоточенные массы. Применив принцип Лагранжа, для обобщенной концевой силы инерции, соответствующей  $j$ -й компоненте вектора  $\mathbf{W}_{xy}$  (11), получим ( $j = 1, \dots, 6$ )

$$\begin{aligned} J_j^{xy}(t) &= \int_l^{x_k} q_x^{(d)} f_{uj} dx + \int_l^{x_k} q_y^{(d)} f_{vj} dx + \int_l^{x_k} m_z^{(d)} f_{uj}' dx + \\ &+ \sum_k [F_{x,k} f_{uj}(x_k) + F_{y,k} f_{vj}(x_k) + M_{z,k} f_{uj}'(x_k)]. \end{aligned}$$

Подставляя сюда распределенные и сосредоточенные инерционные нагрузки

$$q_x^{(d)}(x, t) = -m_A \ddot{u} + m_S \ddot{v}, \quad q_y^{(d)}(x, t) = m_A \ddot{v}, \quad m_z^{(d)}(x, t) = -m_I \ddot{v}' + m_S \ddot{u},$$

$$\begin{aligned}
F_{x_k}(t) &= -M\ddot{x}_k + S_x \dot{v}'(x_k), \quad F_{y_k}(t) = -M\dot{y}_k - S_y \dot{v}'(x_k), \\
M_{z_k}(t) &= S_x \dot{u}(x_k) + S_y \dot{v}(x_k) + J_r \dot{\vartheta}'(x_k), \\
[M, S_x, S_y, J_r] &= \iiint_V [1, y, x, (x^2 + y^2)] dm,
\end{aligned}$$

с учетом (12) имеем вектор обобщенных сил инерции слоистого стержня в локальной системе координат

$$\mathbf{J}_{xy}(t) = -\mathbf{M}_{xy} \ddot{\mathbf{W}}_{xy}(t). \quad (16)$$

Компоненты матрицы обобщенных масс стержня  $\mathbf{M}_{xy}$  в (16) определяются выражениями

$$\begin{aligned}
\{\mathbf{M}_{xy}\}_{ij} &= \int_l (m_A f_{uj} - m_S f'_{vj}) f_{ui} dx + \int_l m_A f_{vj} f_{vi} dx + \int_l (m_S f_{uj} - m_I f'_{vj}) f'_{vi} dx + \\
&+ \sum_k [-M_k (f_{ui}^k f_{uj}^k + f_{vi}^k f_{vj}^k) + S_{xk} (f_{vi}^k f_{uj}^k + f_{ui}^k f_{vj}^k) + \\
&+ S_{yk} (f_{ui}^k f_{uj}^k - f_{vi}^k f_{vj}^k) + J_k f_{ui}^k f_{vj}^k], \quad f_i^k = f_i(x_k).
\end{aligned} \quad (17)$$

После учета инерционных факторов (16) и выполнения преобразования  $\mathbf{J}_{xy} \rightarrow \mathbf{F}_d$  матричные уравнения движения (9) принимают вид

$$\mathbf{A}_S(\mathbf{W})\mathbf{S}(t) + \mathbf{F}(t) = \mathbf{M}_W \ddot{\mathbf{W}}(t), \quad (18)$$

где  $\mathbf{M}_W$  — инерционная матрица рамы, сформированная из матриц масс стержней

$$\mathbf{M}_{W,j} = \mathbf{C}_j \mathbf{M}_{xy} \mathbf{C}_j^\top \quad (j = 1, \dots, n)$$

в общей системе координат;

$\mathbf{C}_j$  — матрица преобразования базиса  $j$ -го стержня;  
 $\ddot{\mathbf{W}}(t)$  — вектор узловых ускорений.

Условия связи перемещений и обобщенных деформаций запишем в виде

$$\mathbf{A}_W(\mathbf{W})\mathbf{W}(t) + \mathbf{L}(t) = 0, \quad (19)$$

где матрица  $\mathbf{A}_W(\mathbf{W})$  с функциональными компонентами, зависящими от перемещений  $\mathbf{W}(t)$ , сформирована из матриц преобразования базисов перемещений  $\mathbf{W} \rightarrow \mathbf{L}$  для отдельных гибких элементов ( $j = 1, \dots, n$ )

$$\begin{aligned}
\mathbf{a}_{W,j}(\alpha_j) &= \\
= \left[ \begin{array}{c} \mathbf{a}_W^b \\ \mathbf{a}_W^e \end{array} \right]_j &= \left[ \begin{array}{ccccc|c} c - \alpha s / 2 & s + \alpha c / 2 & 0 & -c + \alpha s / 2 & -s - \alpha c / 2 & 0 \\ -(s + \alpha c) / l & (c - \alpha s) / l & 1 & (s + \alpha c) / l & -(c - \alpha s) / l & 0 \\ (s + \alpha c) / l & -(c - \alpha s) / l & 0 & -(s + \alpha c) / l & (c - \alpha s) / l & -1 \end{array} \right] \quad (20)
\end{aligned}$$

$$c = \cos \varphi, \quad s = \sin \varphi, \quad \alpha_j(t) = (v_e - v_b) / l.$$

При  $\alpha = 0$  из (20) получим матрицу линейного преобразования перемещений с выполнением условия  $\mathbf{A}_W = \mathbf{A}_S^\top$ .

Физическое равенство представим на основе (2), (4) в квазилинейной форме

$$\mathbf{B}^{-1}(\mathbf{W})\mathbf{L}(t) + \mathbf{B}_V^{-1}(\mathbf{W})\dot{\mathbf{L}}(t) = \mathbf{S}(t) \quad (21)$$

с использованием переменных во времени матриц податливости  $\mathbf{B}(\mathbf{W}) = \text{diag}[\mathbf{B}_1 \dots \mathbf{B}_n']$  по направлению обобщенных деформаций  $\mathbf{L}(t)$  и вязкого

течения  $\mathbf{B}_V(\dot{\mathbf{W}}) = \text{diag}[\mathbf{B}_{V1} \dots \mathbf{B}_{Vn}]$  по направлению скоростей  $\dot{\mathbf{L}}(t)$ . Для  $j$ -го гибкого слоистого стержня из разносопротивляющихся материалов компоненты  $\xi_{ij}(t)$  матриц  $\mathbf{B}_j$ ,  $\mathbf{B}_{Vj}$  представлены через переменные по пространству и времени характеристики жесткости (6) и вязкости (7) формулами

$$\begin{aligned}\xi_{11} &= \int_l \frac{\Omega_I + v_h \Omega_S}{\Omega} dx, \quad \xi_{12} = \int_l \frac{(1-\bar{x})\Omega_S + \theta_h \Omega_I}{\Omega} dx, \\ \xi_{13} &= \int_l \frac{\bar{x}\Omega_S - \theta_h \Omega_I}{\Omega} dx, \quad \xi_{21} = \int_l \frac{(1-\bar{x})\Omega_S + v_h \Omega_A}{\Omega} dx, \\ \xi_{22} &= \int_l \frac{(1-\bar{x})\Omega_A + \theta_h \Omega_S/l}{\Omega} dx, \quad \xi_{23} = \int_l \frac{(1-\bar{x})\bar{x}\Omega_A - \theta_h \Omega_S/l}{\Omega} dx, \\ \xi_{31} &= \int_l \bar{x} \frac{\Omega_S + v_h \Omega_A}{\Omega} dx, \quad \xi_{32} = \int_l \bar{x} \frac{(1-\bar{x})\Omega_A + \theta_h \Omega_S/l}{\Omega} dx, \\ \xi_{33} &= \int_l \bar{x} \frac{\bar{x}\Omega_A - \theta_h \Omega_S/l}{\Omega} dx, \quad \Omega(x) = \Omega_A \Omega_I - \Omega_S^2, \quad \Omega \in [D, V].\end{aligned}\quad (22)$$

При вычислении компонент матриц податливости следует в (22) положить  $\Omega = D(\varepsilon, x)$  (6), а для матриц вязкого течения —  $\Omega = V(\dot{\varepsilon}, x)$  (7). В выражениях (22) использованы прогибы и углы поворота относительно хорды «*b-e*»

$$\begin{aligned}v_h(x, t) &= v(x, t) - v_b(t)(1-\bar{x}) - v_e(t)\bar{x}, \\ \theta_h(x, t) &= \theta(x, t) - [v_e(t) - v_b(t)]/l.\end{aligned}\quad (23)$$

Матричные равенства (18), (19), (21) образуют замкнутую систему уравнений для динамического расчета рамной системы в геометрически и физически нелинейной постановке. Окончательно представим ее в обычной форме метода перемещений

$$\mathbf{M}_W \ddot{\mathbf{W}}(t) + \mathbf{R}_V \dot{\mathbf{W}}(t) + \mathbf{R}_W \mathbf{W}(t) = \mathbf{F}(t), \quad (24)$$

с переменными матрицами жесткости  $\mathbf{R}_W$ , демпфирования  $\mathbf{R}_V$ :

$$\begin{aligned}\mathbf{R}_W(\mathbf{W}) &= \mathbf{A}_S(\mathbf{W})[\mathbf{B}(\mathbf{W})]^{-1} \mathbf{A}_W(\mathbf{W}), \\ \mathbf{R}_V(\mathbf{W}) &= \mathbf{A}_S(\mathbf{W})[\mathbf{B}_V(\dot{\mathbf{W}})]^{-1} \mathbf{A}_W(\mathbf{W})\end{aligned}\quad (25)$$

и инерционной  $\mathbf{M}_W$ .

Вектор искомого решения  $\mathbf{W}(t)$  подчиним начальным условиям

$$\mathbf{W}(0) = 0, \quad \dot{\mathbf{W}}(0) = 0. \quad (26)$$

**3. Построение численного решения прямой нелинейной задачи.** Решение нелинейной начальной задачи (24), (26) построим на основе шаговой процедуры по временной координате  $t_{i+1} = t_i + \Delta t$  ( $i = 0, 1, \dots$ ). Аналогично методам Ньюмарка и Вильсона<sup>1</sup> в пределах малого  $i$ -го шага примем линейность ускорения  $\ddot{\mathbf{W}}(t)$  между узловыми значениями  $\ddot{\mathbf{W}}_i$ ,  $\ddot{\mathbf{W}}_{i+1}$ . Тогда для скоростей и перемещений в момент времени  $t_{i+1}$  получим

<sup>1</sup> Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов / Пер. с англ. А.С. Алексеева и др.; под ред. А.Ф. Смирнова. М.: Стройиздат, 1982. 448 с.

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{W}}_{i+1} &= \dot{\mathbf{W}}_i + \frac{1}{2} \ddot{\mathbf{W}}_i \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{\mathbf{W}}_{i+1} \Delta t, \\ \mathbf{W}_{i+1} &= \mathbf{W}_i + \dot{\mathbf{W}}_i \Delta t + \frac{1}{3} \ddot{\mathbf{W}}_i \Delta t^2 + \frac{1}{6} \ddot{\mathbf{W}}_{i+1} \Delta t^2.\end{aligned}\quad (27)$$

Записав (24) для момента времени  $t_{i+1}$ , при учете (27) получим для ускорения

$$\tilde{\mathbf{M}}_i \ddot{\mathbf{W}}_{i+1} = \tilde{\mathbf{F}}_i, \quad (28)$$

$$\tilde{\mathbf{M}}_i = \mathbf{M} + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{R}_{Vi} + \frac{\Delta t^2}{6} \mathbf{R}_{Wi}, \quad \mathbf{R}_{Vi} = \mathbf{R}_V(\dot{\mathbf{W}}_i), \quad \mathbf{R}_{Wi} = \mathbf{R}_W(\mathbf{W}_i),$$

$$\tilde{\mathbf{F}}_i = \mathbf{F}_i - \mathbf{R}_{Vi} \left[ \dot{\mathbf{W}}_i + \frac{\Delta t}{2} \ddot{\mathbf{W}}_i \right] - \mathbf{R}_{Wi} \left[ \mathbf{W}_i + \Delta t \dot{\mathbf{W}}_i + \frac{\Delta t^2}{3} \ddot{\mathbf{W}}_i \right].$$

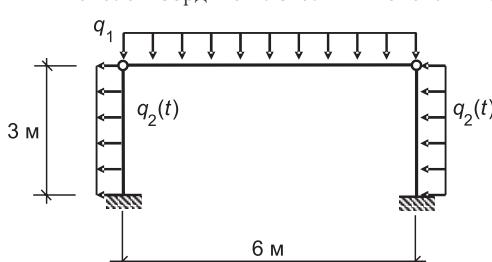
Вычисления на  $i$ -м шаге выполняются по следующей схеме. Через компоненты векторов  $\mathbf{W}_i$ ,  $\dot{\mathbf{W}}_i$  находятся концевые перемещения  $[u_b v_b \theta_b u_e v_e \theta_e]_{ij}$  и скорости  $[\dot{u}_b \dot{v}_b \dot{\theta}_b \dot{u}_e \dot{v}_e \dot{\theta}_e]_{ij}$  в локальных базисах стержней рамы ( $j = 1, \dots, n$ ), а затем — функции: перемещений  $u_{ij}(x)$ ,  $v_{ij}(x)$ , скоростей перемещений  $\dot{u}_{ij}(x)$ ,  $\dot{v}_{ij}(x)$ , деформаций  $\varepsilon_{x,ij}(x, y)$ ,  $\dot{\varepsilon}_{x,ij}(x, y)$  и напряжений  $\sigma_{ij}^{(k)}(x, y)$ . Выявленная картина распределения значков деформаций и скоростей позволяет идентифицировать по пространству  $j$ -го многослойного стержня физические характеристики разноопротивляющихся материалов  $E_k^+$ ,  $E_k^-$ ,  $\eta_k^+$ ,  $\eta_k^-$ , а при их использовании — интегральные величины (6), (7), матрицы  $\mathbf{B}_{ij}$ ,  $\mathbf{B}_{Vij}$  ( $j = 1, \dots, n$ ). При интегрировании компонент указанных матриц по формулам (25) целесообразно функциональные характеристики (6), (7) представить в дискретной форме в заданных расчетных сечениях стержней. Далее на основе (25) для рамы в целом строятся матрицы жесткости  $\mathbf{R}_{Wi}$  и вязкого сопротивления  $\mathbf{R}_{Vi}$  с использованием зависящих от перемещений статической  $\mathbf{A}_{Si}$  (10) и геометрической  $\mathbf{A}_{Wi}$  (20) матриц на  $i$ -м шаге. Затем с применением (28), (27) определяются векторы  $\mathbf{W}_{i+1}$ ,  $\dot{\mathbf{W}}_{i+1}$ ,  $\mathbf{W}_{i+1}$  на  $i+1$ -м шаге.

Повторяя указанные этапы вычислений, выявляем последовательность динамических равновесных состояний рамы. В начальный момент времени полагаем выполнение условий  $\mathbf{W}_0 = \dot{\mathbf{W}}_0 = \ddot{\mathbf{W}}_0 = 0$ . На шаге  $i = 0$  расчеты выполняются для линейно деформируемой рамы.

**4. Пример.** Для иллюстрации разработанной методики выполним динамический расчет модельной рамы (рис. 1) с абсолютно жестким невесомым ригелем и деревянными стойками прямоугольного сечения при действии статической  $q_1$  и динамической нагрузки  $q_2(t) = q_0 \exp(-t/t_0)$ . Примем следующие исходные данные:  $q_1 = 10 \text{ кН}/\text{м}$ ,  $q_0 = 3 \text{ кН}/\text{м}$ ,  $t_0 = 0,5 \text{ с}$ ,  $b = 10 \text{ см}$ ,  $h = 25 \text{ см}$ ,  $E^+ = 16,7 \text{ ГПа}$ ,  $E^- = 11,2 \text{ ГПа}$ ,  $\eta^+ = \eta^- = 4 \text{ МПа}\cdot\text{с}$ ,  $\rho = 600 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Начала координат локальных систем в стойках размещены в центрах тяжести нижних сечений. Расчеты выполнены при шаге  $\Delta t = 0,001 \text{ с}$ . На рис. 2 приведены графики изменения максимального прогиба стоек  $v_{\max}(t)$  — общий и фрагмент (линия 1) для начального интервала времени. Период первой волны затухающего процесса составил  $T = 0,053 \text{ с}$  ( $\omega = 119,5 \text{ с}^{-1}$ ), а наибольшее перемещение  $v_{\max}(0,026) = 13,9 \text{ мм}$ . В сравнении со статическим перемещением от действия

Рис. 1. Схема рамы



амплитудной нагрузки  $q_2(0)$ , равным 18,2 мм, это в 1,3 раза меньше, что, с одной стороны, объясняется быстрым падением нагрузки  $q_2(t)$  взрывного типа, а с другой — наличием инерционных и диссипативных свойств системы. В наиболее нагруженном сечении стойки ( $x = 0$ ) в опасный момент времени ( $t = 0,026$  с) фибровые напряжения составили  $\sigma_x(-0,5h) = 36,9$  МПа,  $\sigma_x(0,5h) = -27,2$  МПа.

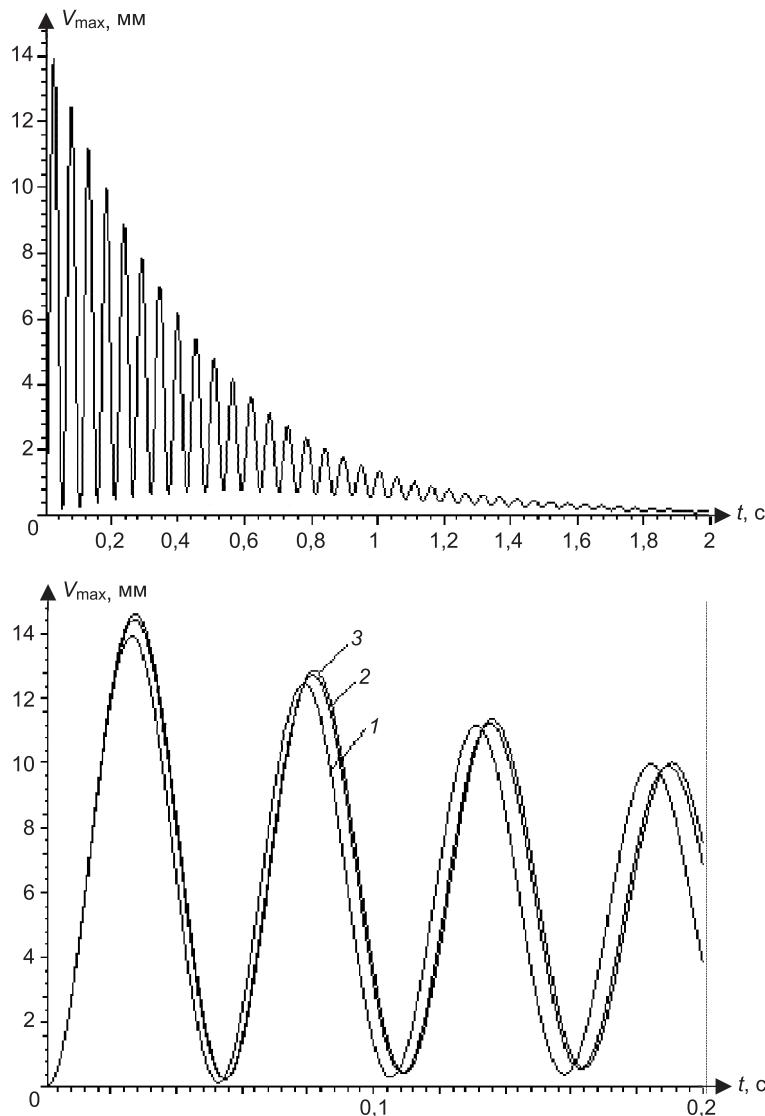


Рис. 2. Изменение максимального прогиба стоек

1 — нелинейный расчет; 2 — использование единого модуля  $E = 10$  ГПа;  
3 — линейный расчет с модулем  $E$

Особенность данной задачи заключается в том, что функциональные по пространству конструкции характеристики жесткости (6) и вязкости (7) изменяются также и во времени. В начальный момент времени во всем объеме материала стоек реализуется однородная деформация сжатия с модулем  $E^-$  при напряжении  $\sigma_x = -1,2$  МПа. Далее по мере роста нагрузки  $q_2(t)$  нарастает неоднородность деформации. С момента  $t = 0,004$  с в стойках, начиная с точки  $x = 0, y = -0,5h$ , появляется область растяжения и расчет переменных жесткостных характеристик (6) выполняется по модели разномодульного материала. Конфигурации зон

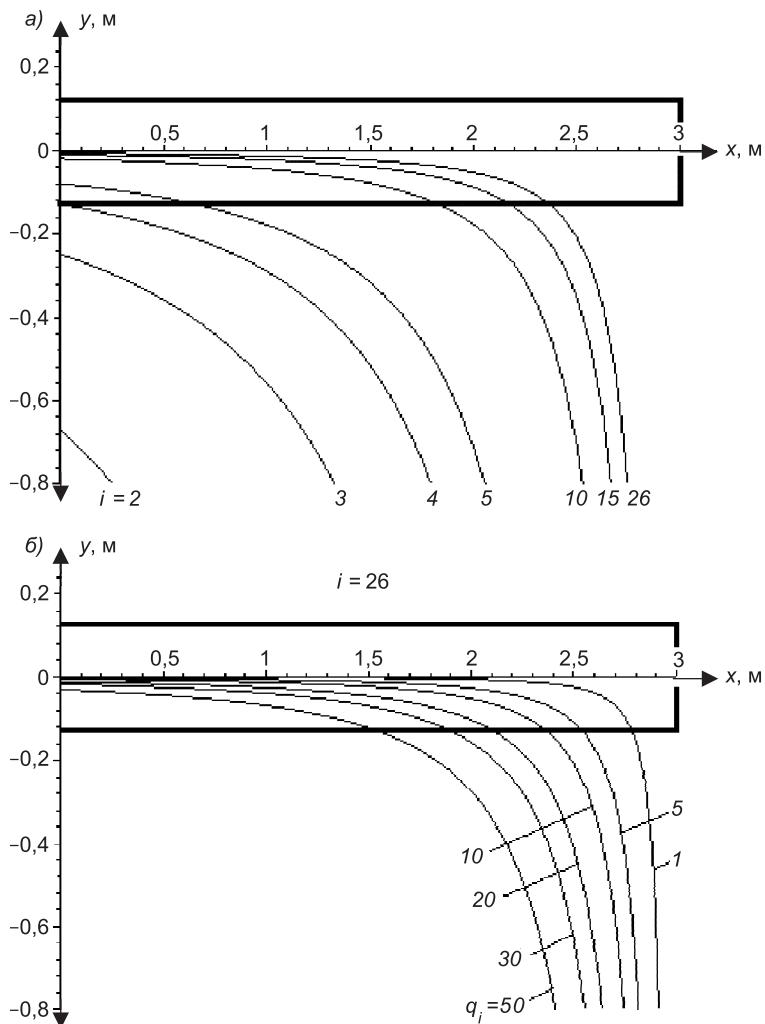


Рис. 3. Положение нейтрального слоя в стойках рамы  
 а — на  $i$ -м шаге временной процедуры; б — при различных значениях статической нагрузки  $q_1 = 1, 5, 10, 20, 30, 50$  (кН/м) на 26-м шаге процедуры

растяжения и сжатия, разделенных нейтральным слоем  $y_{n.s.}(x, t)$ , в различные моменты времени, соответствующие номеру шага  $i$ , показаны на рис. 3, а.

При использовании единого модуля упругости  $E = 10$  ГПа, рекомендованного нормами проектирования<sup>2</sup>, максимальные перемещения составили 14,4 мм (см. рис. 2, линия 2), что на 3,6 % превышает результаты расчета по модели разномодульного материала. При дополнительном игнорировании в (8) нелинейного члена  $Nv''$  деформирование соответствует линии 3 с максимальным перемещением 14,6 мм (превышение на 5 %).

Величины отклонений параметров напряженно-деформированного состояния, обусловленные двумя рассмотренными факторами, в данном примере зависят в том числе и от величины статической нагрузки  $q_1$ . При ее росте эффект от учета разномодульности снижается, а от нелинейности  $Nv''$  — возрастает. На рис. 3, б показано положение нейтрального

<sup>2</sup> СНиП II-25-80. Деревянные конструкции / Госстрой России. М.: ГУП ЦПП, 2003.

слоя при различных значениях нагрузки  $q_1$ . Наличие более сложных динамических нагрузок приводит к более выраженным эффектам от учета разномодульности.

Модель разномодульного материала по сравнению с другими физически нелинейными моделями разносопротивляющихся материалов характеризуется, во-первых, в силу использования квазилинейных определяющих соотношений, существенно меньшей вычислительной трудоемкостью; во-вторых, как показано в [1], хорошей достоверностью отражения основных особенностей нелинейного деформирования таких материалов, как древесина, пластмассы и другие в ограниченном диапазоне. В связи с этим данная модель может успешно применяться в статических и динамических расчетах физически нелинейного деформирования конструкций.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мищенко, А.В. Нелинейное деформирование слоистого стержня [Текст] / А.В. Мищенко, Ю.В. Немировский // Успехи строительной механики и теории сооружений: сб. тр. к 75-летию В.В. Петрова. — Саратов : Изд-во СГТУ, 2010. — С. 174–184.
2. Амбарцумян, С.А. Разномодульная теория упругости [Текст] / С.А. Амбарцумян. — М.: Наука, 1982. — 320 с.
3. Судакова, И.А. Поперечный изгиб трехслойных прямоугольных пластин из анизотропных разносопротивляющихся материалов [Текст] / И.А. Судакова, А.А. Трещев // Изв. вузов. Строительство. — 2002. — № 7. — С. 11–16.
4. Матченко, Н.М. Теория деформирования разносопротивляющихся материалов. Определяющие соотношения [Текст] / Н.М. Матченко, А.А. Трещев. — М. ; Тула : РААСН, ТулГУ, 2000. — 149 с.
5. Галоян, А.Г. Поперечный изгиб балок, изготовленных из разномодульного материала [Текст] / А.Г. Галоян, А.А. Хачатрян // ДАН. АрмССР. — 1976. — Т. 62, № 3. — С. 151–157.

МИЩЕНКО А.В., канд. техн. наук, доц.; E-mail: mavr@hnet.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

НЕМИРОВСКИЙ Ю.В., д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: nemirov@itam.nsc.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 16.10.11

**Mishchenko A.V.**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: mavr@hnet.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Nemirovsky Yu.V.**, doctor of physical and mathematical sciences, professor; E-mail: nemirov@itam.nsc.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

#### DYNAMIC OF LAYERED FRAMES MADE FROM DIFFERENTLY RESISTANCE MATERIALS

The problem of application differently module model for layered frames made from differently resistance materials are considered.

Key words: layered frame, dynamical forces, differently module.

#### REFERENCES

1. Mischenko, A.V. Nonlinear Deflection of Layered Rod [Text] / A.V. Mischenko, Yu.V. Nemirovsky // Success of Building Mechanic and

- Construction Theory : Scientific Article Consecrated 75-anniversary of V.V. Petrov. — Saratov : SGTU publishing house, 2010. — P. 174–184.
2. Ambarsumyan, S.A. Differently Module Theory of Elasticity [Text] / S.A. Ambarsumyan. M. : Science, 1982. — 320 p.
  3. Sudakova, I.A. Cross bending of three-layered rectangular plate made from anisotropic differently resistance materials [Text]/ I.A. Sudakova, A.A. Treschev // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2002. — N 7. — P. 11–16.
  4. Matchenko, N.M. The differently resistance materials theory. Basic formulation materials [Text] / N.M. Matchenko, A.A. Treschev. — M. ; Tula : Russian Academy of Architectural and Civil Engineering Sciences, Tula State University, 2000. — 149 p.
  5. Galoyan, A.G. Cross Bend of Beams, Made from Differently Module Material [Text] / A.G. Galoyan, A.A. Hachatryan // Report of Sciences Academy Armenia SSR. — 1976. — Vol. 62, N 3. — P. 151–157.
-

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.42

Н.А. МАШКИН, И.М. СЕБЕЛЕВ, Т.Ф. КАТКОВА, Ю.А. ШАРАВИН

### ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННЫЙ КЕРАМИЧЕСКИЙ КИРПИЧ ИЗ ПЫЛЕВАТЫХ СУГЛИНКОВ

Показано, что введение металлических опилок в состав керамической массы из пылеватых суглинков при производстве лицевого кирпича позволяет повысить его физико-механические свойства.

Ключевые слова: лицевой кирпич, пылеватые суглинки, металлонаполнитель.

Высококачественный керамический кирпич остается востребованым материалом в современном строительстве, но производится далеко не во всех регионах страны. Для изготовления изделий стеновой керамики используют в основном легкоплавкие глинистые породы, доля которых невелика.

В производстве применяются породы различного гранулометрического, химического и минералогического составов. По пластичности наиболее пригодны умеренно-пластичные глины с числом пластичности  $P = 7-15$ . Малопластичные глины ( $P < 7$ ) плохо формуются, изделия из глины с числом пластичности 15 образуют большое количество трещин при сушке и требуют корректировки их свойств отощающими добавками. Содержание грубых включений (размеры более 2 мм) не должно превышать 10 %. Огневая усадка кирпичных глин в большинстве случаев не превышает 3 %, а интервал спекания — не более 50 °C. В производстве пустотелых керамических изделий используют в основном легкоплавкое глинистое сырье с низкой чувствительностью к сушке.

Химический состав глинистого сырья для стеновой керамики колеблется в широких пределах (%):  $\text{SiO}_2$  — 45–85;  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$  — 7–28;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 2–14;  $\text{CaO}$  — 0,5–20;  $\text{MgO}$  — 0,2–4;  $\text{R}_2\text{O}$  — 0,3–7; п.п.п — 3–15;  $\text{SO}_3$  — не более 0,8.

Гранулометрический состав сырья также характеризуется большим разнообразием. Содержание отдельных фракций в большинстве глиносодержащих пород: глинистых — 7–25 %; пылеватых — 30–60 %; песчаных — 25–30 %.

Сырье для керамического кирпича и камней должно иметь хорошую формуемость, обеспечивать сушку полуфабрикатов без деформаций и трещин, а после обжига — достаточную прочность и другие свойства изделий согласно требованиям ГОСТ 530 «Кирпич и камни керамические».

Однако глины большинства месторождений Новосибирской области и других регионов Сибири не удовлетворяют необходимым требованиям. Например, широко распространены глины, относящиеся к группе низкодисперсного сырья, представляющие собой пылеватые суглинки сложно-го полиминерального состава, глинистая часть которых состоит из смеси

монтмориллонита, гидрослюды и каолинита. Кроме того, они могут содержать и различные примеси, ухудшающие формующие свойства сырья и качество готовых изделий: кварцевый песок, карбонаты, сульфаты, слюды, железистые соединения, органические примеси.

Весьма своеобразны технологические свойства пылеватых суглинков, такие как пластичность и связующая способность. Оценка поведения пылеватых суглинков в сушке показала, что особенности минералогии суглинков сказываются на их сушильных свойствах, определяя высокую чувствительность к сушке и, как следствие, низкую трещиностойкость полуфабриката. Это приводит к образованию трещин, увеличению количества брака на предприятиях и снижает качество продукции и производительность.

Управление свойствами, т.е. получение комплекса заданных свойств керамического кирпича (прочности, водопоглощения и т.д.), состоит в создании необходимой структуры кирпича путем технологического воздействия на сырьевые материалы, особенно если это пылеватые суглинки.

Процессы разложения минералов, входящих в состав используемых суглинков, были исследованы методами термогравиметрии (ТГ, ДТГ) и дифференциально-термического анализа (ДТА) (рис. 1). На кривых ДТГ исследуемых суглинков наблюдаются эндоэффекты удаления гигроскопической и межпакетной воды. Высокотемпературные эндоэффекты связаны с разложением глинистых минералов и карбонатов.

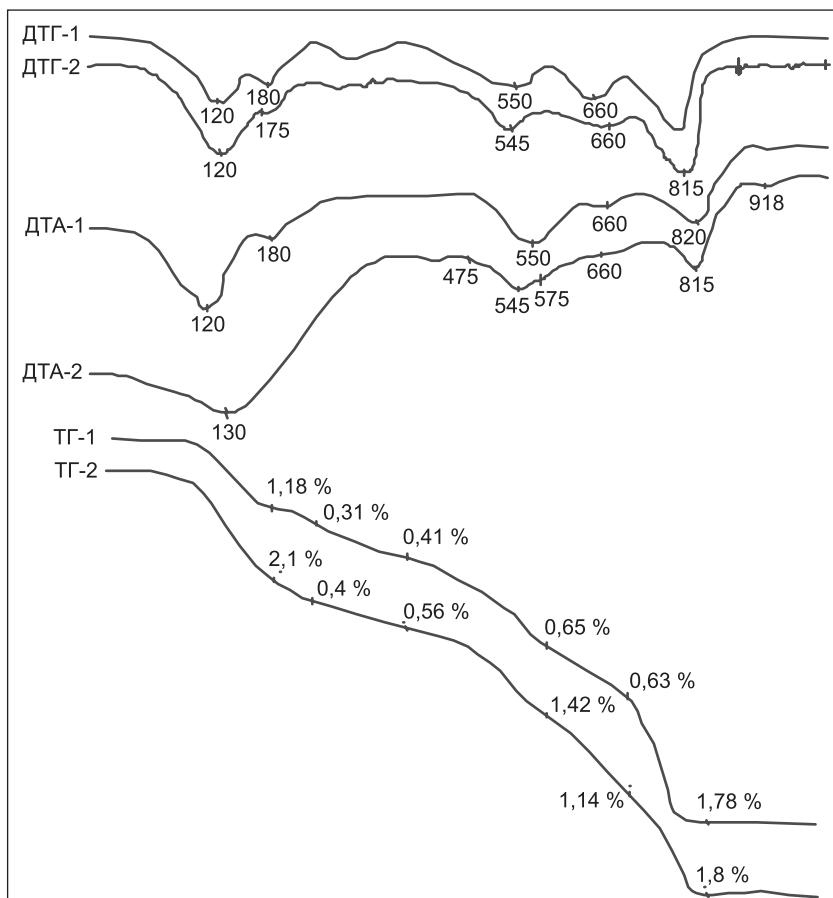


Рис. 1. Кривые ДТА, ДТГ и ТГ

1 — маслянинский суглинок; 2 — клещихинский суглинок

Спекание суглинков без добавок исследовалось по изменению водопоглощения и прочности при сжатии обожженных изделий. Испытуемые образцы обжигались при температурах от 750 до 1050 °С. Значения прочности и водопоглощения после обжига ( $R_{сж} = 9-11$  МПа,  $W = 16-18 \%$ ) свидетельствуют о низком качестве обожженных материалов.

Глинистое сырье Клещихинского месторождения представлено средними и тяжелыми суглинками с низким содержанием крупнозернистых включений. Порода среднедисперсная, среднопластичная. По химическому составу (табл. 1) сырье кислое (К), с высоким содержанием красящих оксидов и низким содержанием водорастворимых солей.

Таблица 1

**Химический состав суглинистого сырья**

Проба	Содержание оксидов, % по массе						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	R <sub>2</sub> O	П.п.п.
Клещихинский	60,58	12,26	4,64	5,93	2,08	3,54	7,74
Болотниковский	61,0	12,54	4,69	5,67	1,84	4,74	7,42

Таблица 2

**Гранулометрический состав сырья (ОСТ 21-78-88)**

Крупно-зернистые включения	Размер фракций, мм					Число пластичности
	1–0,06	0,06–0,005	менее 0,005	менее 0,01	менее 0,001	
<i>Содержание, %</i>						
0–0,55	0,21–3,08	57,97–67,81	25,24–39,49	38,47–46,38	17,79–29,63	9,3–16,4

По гранулометрическому составу и числу пластичности исследованные суглинки соответствуют требованиям ОСТ 21-78-88 на кирпичное сырье (табл. 2).

Если результаты определения гранулированного состава глин разместить в системе треугольных координат «глина – пылеватые – песок», то суглинки новосибирских месторождений (Клещихинского, Болотникского и др.) расположатся в поле, предназначенном для средних и легких пылевых суглинков, а также для супесей (рис. 2).

Химический состав суглинков и глин характеризует их как полукислое сырье (содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + SiO<sub>2</sub> в пределах 12,26–14,84 %), железистое с высоким содержанием красящих окислов (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + FeO в пределах 4,64–6,11 %). Основные керамические свойства представлены в табл. 3.

При выборе экспериментальных составов сырьевых шихт для производства кирпича на основе местных клещихинских пылеватых суглинков с целью улучшения качества кирпича ориентировались на необходимость снижения величин воздушной усадки и чувствительности к сушке глинистого сырья путем введения структурирующих добавок при обеспечении необходимых формовочных свойств и требуемого обеспечения марочности кирпича.

Было опробовано применение структурирующей добавки в виде стальных опилок (фракции < 2,5 мм) по двум технологиям: по технологии пластического формования (применяемой на ОАО ЗСМ-7 г. Новосибирска) и по технологии полусухого прессования. Для улучшения качества керамического черепка в пылеватые суглинки вводились плавни (стеклобой), регулирующие спекание глинистого сырья при обжиге, и структурирующие

добавки (металлонаполнитель), изменяющие структуру черепка и повышающие его прочность. Конструкционный керамический кирпич, таким образом, представлял собой композит — материал, в глинистой матрице которого хаотично распределены волокна стальных опилок.

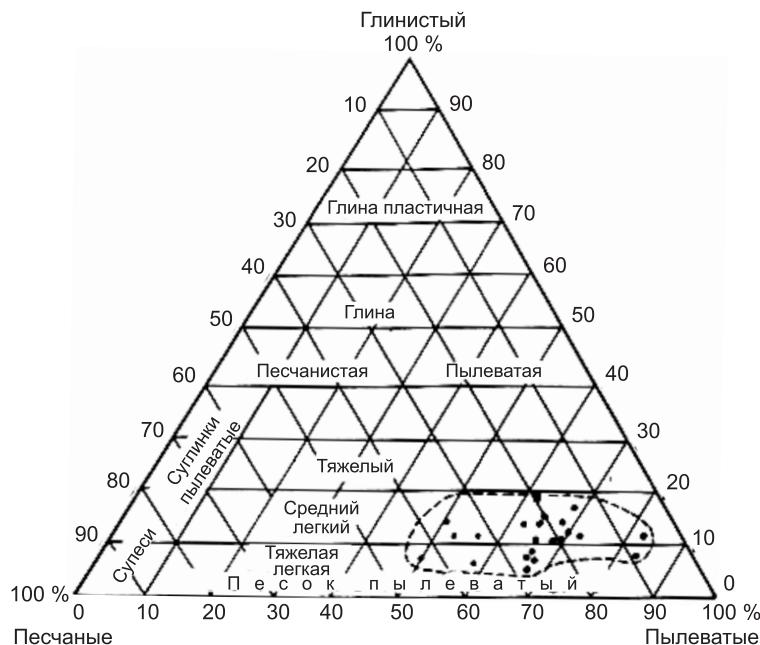


Рис. 2. Классификация глинистого сырья Новосибирской области в треугольной диаграмме

Таблица 3  
**Керамические свойства сырья  
Клецкихинского месторождения**

Показатель	Значение
Воздушная усадка, %	6,5
Огневая усадка, %	0,2
Карьерная влажность, %	18
Число пластичности	15
Содержание фракции частиц менее 1 мкм, %	17,79–29,63

По результатам лабораторных испытаний разработаны технологические процессы производства дискретно армированного кирпича пластического формования и полусухого прессования, начиная от добычи глинистого сырья и заканчивая процессом обжига изделий. Разработана автоматизированная линия производства керамического кирпича от подачи глины из шихтозапасника на вальцы тонкого помола до получения отформованного на прессе бруса.

При полусухом способе прессования предложена технология подготовки пресс-порошков из суглинков с корректирующими добавками после физической, химической и механотермической активации.

Возможность регулирования гранулометрического состава получаемого пресс-порошка позволяет повысить качество прессования сырца (на прессах СМ-1085, СМК-519, СМК-491), снизить чувствительность к суш-

Подбор оптимального состава шихты был выполнен с помощью методов математического планирования. Шихта для изготовления керамических изделий, дисперсно армированных стальными опилками, играющими роль структурирующих добавок и добавок, улучшающих спекание черепка, содержит, мас. %: лессовидный суглинок (76–86); стальные опилки (11–17); молотое тарное стекло (3–6). Оптимальный состав шихты запатентован [1].

ке и обжигу (стальные опилки воспринимают на себя основную часть напряжений, возникающих в композите при сушке и обжиге), т.е. увеличить трещиностойкость кирпича и увеличить его марочность.

При отработке различных технологий изменяли состав сырьевой шихты, что способствовало изменению и структуры изделий. Например, при добавлении угля при пластическом способе производства после обжига получался пористый керамический черепок, а при добавлении тарного стекла при полусухом способе черепок становился плотным.

Состав и особенности вводимых добавок проявлялись в значительном изменении свойств получаемого кирпича. Прочность при пластическом способе формования увеличилась с 10 до 20 МПа, при полусухом способе прессования — до 33 МПа.

При постановке экспериментов по оптимизации состава шихт и технологических процессов изучаемыми откликами являлись: водопоглощение по массе обожженных образцов; средняя плотность обожженных изделий; прочность при сжатии керамического черепка после обжига; прочность при сжатии керамического черепка в насыщенном водой состоянии.

Из выбранных оптимальных составов наиболее прочным и трещиностойким получился кирпич, изготовленный по полусухому способу производства (предел прочности при сжатии 30 МПа, водопоглощение 11,69 %). Высокая прочность полученного кирпича после водонасыщения — 26,7 МПа дает возможность прогнозировать его эксплуатационную долговечность [2].

Высокую трещиностойкость и механическую прочность керамического кирпича можно связать с различными значениями модулей упругости керамики и стальных опилок в материале. Сталь с высоким модулем упругости ( $E > 200$  ГПа) воспринимает на себя основную часть напряжений, возникающих в кирпиче при сушке и обжиге [3, 4]. Свойства керамического кирпича дисперсного армирования представлены в табл. 4.

Таблица 4  
Свойства металлоармированного керамического кирпича

Способ производства	Свойства		
	водопоглощение $W_m$ , %	прочность при сжатии $R_{сж}$ , МПа	средняя плотность $\rho$ , г / см <sup>3</sup>
Полусухое прессование	12,4	24,6	2,08
Пластическое формование	9,86	17,1	1,87

**Выводы.** Для улучшения спекания в клещихинский суглинок необходимо вводить добавки в виде плавней, например, стеклобой, а в качестве структурирующей добавки в пылеватый суглинок предлагается вводить металлонаполнитель. Добавка 2,5 мас. % металлонаполнителя дает возможность получать кирпич марок 125–150. При введении 10 мас. % металлонаполнителя прочность кирпича повышается до 18–20 МПа.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. РФ № 2307109. Шихта для изготовления армированных керамических изделий [Текст] : опубл. 27.09.2007.
2. Машкин, Н.А. Оптимизация технологии отделочных и изоляционных материалов [Текст] / Н.А. Машкин, Н.Е. Зибницкая, Ю.А. Шаравин. Строительные материалы (прил. № 8. Технология). — 2006. — № 11. — С. 12–13.

3. Кингери, У.Д. Введение в керамику [Текст] / У.Д. Кингери. — М. : Изд-во литературы по строительству, 1967. — С. 386–387.
4. Будников, П.П. и др. Химическая технология керамики и огнеупоров [Текст] / П.П. Будников. — М. : Стройиздат, 1972. — 552 с.

**МАШКИН Николай Алексеевич**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: mashkin@sibstrin.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**СЕБЕЛЕВ Иван Михайлович**, д-р техн. наук, проф.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**КАТКОВА Татьяна Федоровна**, канд. техн. наук, доц.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**ШАРАВИН Юрий Алексеевич**, инж.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 02.10.11

**Mashkin Nikolai Alekseevich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: mashkin@sibstrin.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Sebelev Ivan Michailovich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Katkova Tatyana Fedorovna**, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Sharavin Yuri Alekseevich**, engineer, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## DISPersed-REINFORCED CERAMIC BRICK OF SILT LOAM

It is shown that the introduction of metal sawdust in the ceramic mass of silt loam soil in the manufacture of brick, improves facial physico-mechanical properties.

**Key words:** face brick, pylevatye loam, metallonapolnitel.

## REFERENCES

1. Patent RF N 2307109. The charge for the manufacture of reinforced ceramics [Text] : Publ. 27.09.2007.
2. Mashkin, N.A. Optimization technology of finishing and insulation materials [Text] / N.A. Mashkin, N.E. Zibnickay, Yu.A. Sharavin // Building materials (annex 8. Technology). — 2006. — N 11. — P. 12–13.
3. Kingeri, U.D. Introduction to ceramics [Text] / U.D. Kingeri. — M. : Izd-vo literature construction, 1967. — P. 386–387.
4. Budnikov, P.P. etc. Chemical Technology of Ceramics and Refractories [Text] / P.P. Budnikov. — M. : Stroyizdat, 1972. — 552 p.

УДК 691.542 : 539.4

М.А. РАКОВ, Г.И. БЕРДОВ, Л.В. ИЛЬИНА, Н.И. НИКОНЕНКО

## ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Введение добавок диопсида и волластонита (1–9 мас. %) способствует повышению прочности цементного камня на 30–70 %. При увеличении удельной поверхности добавок с 3000 до 11 000 см<sup>2</sup>/г оптимальное их содержание уменьшается, однако достигаемое максимальное значение прочности не возрастает. Добавка диопсида более эффективна, чем волластонита.

Ключевые слова: портландцементный клинкер, нормальное хранение, гранулометрический анализ, механическая прочность, минеральные добавки.

Для регулирования свойств цементных материалов используется большое количество различных добавок [1]. Так, повышение прочности цементного камня, прочности и морозостойкости бетона может быть достигнуто введением микроармирующих дисперсных минеральных добавок, таких как диопсид, волластонит. При этом наблюдается четко выраженное оптимальное содержание добавки, соответствующее максимальному значению механической прочности цементных материалов [2].

При использовании минеральных добавок большое значение имеет их дисперсность, так как межфазное взаимодействие при формировании структуры цементного камня развивается на поверхности частиц. Дисперсности материалов, в том числе при достижении ими наноразмерного состояния, в данное время уделяется большое внимание.

Повышение дисперсности частиц и их механохимическая активация могут быть достигнуты при их измельчении в энергонапряженных аппаратах. При этом наряду с увеличением удельной поверхности происходит накопление дефектов в структуре измельчаемых материалов [3, 4].

Как отмечено в работе [3], использование механической активации может обеспечить применение новых источников сырья, в том числе отходов производства при получении строительных материалов, создание вяжущих веществ специального назначения.

В данной работе исследовали портландцементный клинкер производства ООО «Искитимцемент» (Новосибирская область), который применяется для изготовления портландцемента марки ПЦ 400 Д-20. Минералогический состав его, мас. %: C<sub>3</sub>S — 50–55, C<sub>2</sub>S — 18–22, C<sub>3</sub>A — 7–11, C<sub>4</sub>AF — 12–15. Удельная поверхность — 3200 см<sup>2</sup>/г. Химический состав клинкера, мас. %: SiO<sub>2</sub> — 20,7; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 6,9; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 4,6; CaO — 65,4; MgO — 1,3; SO<sub>3</sub> — 0,4; п.п. — 0,5. Клинкер хранился в нормальных условиях (температура 20±2 °C, влажность не более 60 %) в течение 7 сут.

В качестве дисперсных минеральных добавок вводили диопсид и волластонит. Использованный в работе диопсид представлял собой измельченную породу — отход от переработки флогопитовых руд Алданского месторождения (Республика Саха (Якутия)). Выбор добавки обусловлен следующим. Эта добавка является силикатом кальция и магния

$\text{CaMgSi}_2\text{O}_4$  ( $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ ), т.е. близка по составу к основным клинкерным минералам — алиту и белиту и продуктам их гидратации. Кроме того, эта добавка обладает высокой твердостью (7 по шкале Мооса), со-поставимой или превосходящей твердость частиц клинкера. Химический состав диопсида, мас. %:  $\text{SiO}_2$  — 50,3;  $\text{CaO}$  — 24,4;  $\text{MgO}$  — 15,6;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 3,4;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 5,8;  $\text{R}_2\text{O}$  — 0,3. В работе использовался также волластонит, который является метасиликатом кальция  $\text{CaSiO}_3$  и относится к числу цепочечных силикатов. Усредненный состав волластонита Слюдянского месторождения следующий, мас. %:  $\text{SiO}_2$  — 52,5;  $\text{CaO}$  — 46,82;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 0,20;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 0,11;  $\text{Na}_2\text{O}$  — 0,13;  $\text{H}_2\text{O}$  — 0,36. Твердость его по шкале Мооса равна 4,5–5,5.

Различная дисперсность добавок достигалась измельчением в энерго-напряженном аппарате АГО-3, имеющем мощность двигателя 30 кВт и обеспечивающем центробежное ускорение, развиваемое мелющими телами от 400 до 800  $\text{м/с}^2$ , порошков диопсида с исходной удельной поверхностью 2100  $\text{см}^2/\text{г}$  и волластонита с исходной удельной поверхностью 3090  $\text{см}^2/\text{г}$ . Измельчение волластонита производилось в течение 30, 45, 60 с; диопсида, имеющего более высокую твердость, в течение 30, 60, 90, 120 с.

Для определения гранулометрического состава порошков использован лазерный анализатор дисперсности типа PRO-7000 фирмы Seishin Enterprice Co., LTD, Tokyo. Он обеспечивает определение размеров частиц в пределах от 1 до 192 мкм по 16 интервалам значений, получаемые данные являются результатом не менее чем 320 непрерывно происходящих измерений, осуществляемых фотодетекторами в течение 30 с, что обеспечивает их высокую точность и воспроизводимость.

Некоторые данные, характеризующие дисперсность исследованных материалов, приведены в табл. 1.

Количество минеральных добавок изменялось от 1 до 9 % от массы вяжущего. Добавки вводили в предварительно измельченный клинкер с 5 % двуводного гипса.

Прочность при сжатии определялась при испытании образцов цементного камня размерами  $20 \times 20 \times 20$  мм, приготовленных из теста нормальной густоты. Испытания проводились как после 28 сут твердения в нормальных условиях, так и после тепловлажностной обработки, прово-

Таблица 1

**Результаты гранулометрического анализа порошков диопсида и волластонита при различном времени измельчения в планетарной мельнице**

Продолжительность измельчения, с	Среднеобъемный размер частиц, мкм	Удельная поверхность		Объемная доля частиц с размером	
		$\text{см}^2/\text{см}^3$	$\text{см}^2/\text{г}$	$\leq 4$ мкм	$\leq 12$ мкм
<i>Диопсид</i>					
30	27,0	12670	3930	19,5	31,9
60	12,8	20440	6350	32,2	48,4
90	4,3	31530	9790	49,2	66,6
120	2,9	37240	11570	58,2	74,7
<i>Волластонит</i>					
0	28,6	8980	3090	13,3	27,9
30	9,0	21710	7460	36,4	57,6
45	5,9	25840	8880	43,6	65,1
60	4,3	28590	9820	49,0	68,6

димой по режиму — подъем температуры в течение 3 ч, выдержка при температуре 85 °С в течение 6 ч, снижение температуры в течение 2 ч. Результаты определения прочности при сжатии цементного камня, изготовленного из молотого клинкера с добавлением диопсида и волластонита, приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2  
**Прочность при сжатии (МПа) цементного камня, изготовленного из молотого клинкера с добавлением диопсида**

Удельная поверхность диопсида, см <sup>2</sup> /г	Количество добавки диопсида, % от массы вяжущего					
	0	1	3	5	7	9
<i>Твердение в условиях ТВО</i>						
3930	44,5	60,3	51,0	64,7	75,7	62,3
6350	44,5	63,2	56,4	76,4	76,1	66,0
9790	44,5	65,4	62,3	55,6	58,8	50,8
11570	44,5	36,9	55,9	57,9	52,1	49,6
<i>Твердение в нормальных условиях</i>						
3930	60,7	76,1	75,4	82,3	77,3	68,3
6350	60,7	78,8	92,5	89,4	84,1	61,2
9790	60,7	91,1	90,0	87,2	78,7	71,3
11570	60,7	89,8	74,3	72,8	69,3	67,3

Таблица 3  
**Прочность при сжатии (МПа) цементного камня, изготовленного из молотого клинкера с добавлением волластонита**

Удельная поверхность волластонита, см <sup>2</sup> /г	Количество добавки волластонита, % от массы вяжущего					
	0	1	3	5	7	9
<i>Твердение в условиях ТВО</i>						
3090	41,6	69,7	61,1	66,7	67,5	63,4
7460	41,6	51,7	57,9	65,2	67,6	65,0
8880	41,6	61,3	56,7	53,7	50,5	66,5
9820	41,6	61,1	57,5	54,1	57,3	51,3
<i>Твердение в нормальных условиях</i>						
3090	64,7	66,5	59,0	56,4	61,7	57,2
7460	64,7	65,3	71,6	77,6	83,8	76,1
8880	64,7	66,6	67,5	70,8	68,8	72,3
9820	64,7	85,3	69,4	76,1	76,1	59,8

Анализ результатов испытаний показал, что с увеличением удельной поверхности наблюдается уменьшение оптимального количества добавки диопсида у образцов, твердевших как в условиях тепловлажностной обработки, так и в нормальных условиях. У образцов, твердевших в условиях тепловлажностной обработки, при удельной поверхности 3930 см<sup>2</sup>/г максимальное увеличение прочности составило 70,3 % (при 7 % добавки), при 6350 см<sup>2</sup>/г — 71,7 % (при 5 % добавки), при 9790 см<sup>2</sup>/г — 47,2 % (при 1 % добавки). У образцов, твердевших в нормальных условиях, максимальное увеличение прочности составило: при удельной поверхности 3930 см<sup>2</sup>/г — 35,6 % (при 5 % добавки), при 6350 см<sup>2</sup>/г — 52,4 % (при 3 % добавки), при 9790 см<sup>2</sup>/г — 50,1 % (при 1 % добавки), при

11570 см<sup>2</sup>/г — 47,9 % также при 1 % добавки. У образцов, содержащих добавку волластонита, твердевших в условиях тепловлажностной обработки, максимальное увеличение прочности составило: при удельной поверхности 3090 см<sup>2</sup>/г — 67,55 % (при 1 % добавки), при 7460 см<sup>2</sup>/г — 62,5 % (при 7 % добавки), при 8880 см<sup>2</sup>/г — 59,9 % (при 9 % добавки), при 9820 см<sup>2</sup>/г — 46,9 % (при 1 % добавки). У образцов, твердевших в нормальных условиях: при удельной поверхности 3090 см<sup>2</sup>/г максимальное увеличение прочности составило 18,2 % (при 1 % добавки), при 7460 см<sup>2</sup>/г — 29,5 % (при 7 % добавки), при 8880 см<sup>2</sup>/г — 27,2 % (при 5 % добавки), при 9820 см<sup>2</sup>/г — 31,8 % (при 1 % добавки).

Сравнивая значения прочности образцов, полученных в результате твердения в тепловлажностной обработке (ТВО) и в нормальных условиях, можно отметить, что при введении добавки диопсида увеличение прочности относительно бездобавочных цементов примерно одинаково при обоих условиях твердения. При введении добавки волластонита прочность образцов, твердевших в условиях ТВО, возрастает значительно больше, чем после твердения в нормальных условиях.

Соотношения прочности после твердения в нормальных условиях и после ТВО у образцов, содержащих добавку диопсида, близко к такому соотношению у исходного цемента. То есть в обоих случаях введение добавки приводит примерно к одинаковому относительному увеличению прочности. При добавлении волластонита это соотношение существенно меньше, чем у исходного цемента, т.е. прочность возрастает больше в случае тепловлажностной обработки.

В целом большее возрастание прочности достигается при введении добавки диопсида по сравнению с волластонитом. Последняя добавка более эффективна при твердении в условиях тепловлажностной обработки образцов.

Вводимые добавки обусловливают микроармирование цементного камня, препятствуют распространению в нем микротрещин, вызывают перераспределение механических напряжений между частицами добавки и цементным камнем при действии внешних нагрузок. При этом, если модуль упругости добавки больше, чем у цементного камня, ее частица будет воспринимать большие напряжения. По-видимому, вследствие этих причин добавка диопсида, имеющая более высокую твердость, чем волластонит, является более эффективной.

Таким образом, вводимые добавки способствуют повышению прочности цементного камня на 30–70 %. При увеличении дисперсности оптимальное количество добавки, обеспечивающее максимальное возрастание прочности цементного камня, уменьшается. Повышение дисперсности добавки в рассматриваемых пределах не приводит к увеличению максимально достижимого уровня механической прочности цементного камня, т.е. неэффективно. Влияние добавки диопсида более существенно, чем волластонита. Добавка волластонита более эффективна при твердении в условиях тепловлажностной обработки образцов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Добавки в бетон : справочное пособие: пер. с англ. ; под ред. В.С. Рамачандрана. — М. : Стройиздат, 1988. — 575 с.
2. Б е р д о в, Г.И. Влияние количества и дисперсности минеральных добавок на свойства цементных материалов [Текст] / Г.И. Бердов, Л.В. Ильина // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 11–12. — С. 11–16.

3. Болдырев, В.В. Развитие исследований в области механохимии неорганических веществ в СССР [Текст] / В.В. Болдырев // Механический синтез в неорганической химии. — Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1991. — С. 3–32.
4. Аввакумов, Е.Г. Механические методы активации химических процессов [Текст] / Е.Г. Аввакумов. — Новосибирск, 1986. — 303 с.

*РАКОВ Михаил Андreeевич, асп.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*БЕРДОВ Геннадий Ильич, д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*ИЛЬИНА Лилия Владимировна, канд. техн. наук, доц.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*НИКОНЕНКО Нина Игоревна, асп.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено 19.10.11

**Rakov Michael Andreevich**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Berdov Gennadiy Ilich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Ilina Liliya Vladimirovna**, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Nikonenko Nina Igorevna**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **EFFECT OF MECHANICAL ACTIVATION OF MINERAL ADDITIVES STRENGTH CEMENT STONE**

Supplementation of diopside and wollastonite (1–9 % wt.) Contributes to the strength of cement paste at 30–70 %. By increasing the specific surface additives from 3000 to 11000 cm<sup>2</sup>/g best of their content decreases, but the achieved maximum value of strength does not increase. The addition of diopside is more effective than wollastonite.

**Key words:** portland cement clinker, the normal storage, grain size analysis, mechanical strength, mineral supplements.

### REFERENCES

1. Additives in concrete : A Reference Guide: Lane. with English ; ed. V.S. Ramachandran. — M. : Stroyizdat, 1988. — 575 p.
2. Berdov, G.I. Influence of the number and dispersion of mineral additives on the properties of cementitious materials [Text] / G.I. Berdov, L.V. Ilina // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 11–12. — P. 11–16.
3. Boldyrev, V.V. The Development of Research in the Field of Mechanochemistry of Inorganic Substances in the USSR [Text] / V.V. Boldyrev // Mechanical Synthesis in Inorganic Chemistry. — Novosibirsk : Science. Siberian Branch, 1991. — P. 3–32.
4. Avvakumov, E.G. Mechanical Methods of Activation of Chemical Processes [Text] / E.G. Avvakumov. — Novosibirsk, 1986. — 303 p.

УДК 691.618.92

Д.Ю. ДЕНИСОВ, В.З. АБДРАХИМОВ

## К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖИДКОСТЕКОЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

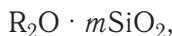
Показывается, что основным условием, обеспечивающим всучивание жидкостекольных систем при их нагревании, является совмещение во времени пиропластического состояния с интенсивным паровыделением внутри термообрабатываемого материала. Каждый из этих факторов в отдельности еще не обеспечивает возникновение процесса всучивания. Необходимо, чтобы они действовали одновременно.

Ключевые слова: жидкостекольные композиции, пористые теплоизоляционные материалы, растворимое стекло, диаграмма состояния, хлорид натрия, термообработка, пористость, капельная фаза, матрица.

Пористые теплоизоляционные изделия на основе всученного жидкого стекла включают широкую гамму материалов, основным структурообразующим элементом которых являются продукты термического или химического всучивания гидратированных щелочных силикатов [1, 2].

Растворимым стеклом называется технический продукт в виде прозрачного стекловидного сплава, имеющего зеленую или желтую окраску с различными переходными оттенками и состоящего из щелочных силикатов [1–4]. Жидкое стекло представляет собой коллоидный водный раствор силиката натрия или силиката калия, имеющий плотность 1,3–1,5 г/см<sup>3</sup> при содержании воды 50–70 %.

Состав щелочных силикатов выражается формулой



где R — Na или K; m — силикатный модуль жидкого стекла.

Модуль натриевого стекла составляет 2,6–3,5; модуль калиевого стекла — 3–4. Формула эта обозначает, что на одну молекулу щелочного оксида приходится m молекул кремнезема.

Состав растворимого стекла может колебаться в широких границах m, в основном определяется количественным соотношением кремнезема и щелочных оксидов Na<sub>2</sub>O или K<sub>2</sub>O.

В продающихся сортах растворимого стекла отношение Na<sub>2</sub>O : SiO<sub>2</sub> находится в пределах от 1 : 1 до 1 : 4, но в границах этих отношений практически и теоретически возможно безграничное разнообразие сочетаний между SiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O и K<sub>2</sub>O [1–3].

Изучая диаграммы состояния Na<sub>2</sub>O–SiO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O, было установлено, что содержание гидратной воды отражается на температуре плавления щелочного силиката [1, 3, 4]. Так, при содержании в силикате 20 % гидратной воды он плавится при 100 °C [4]. При быстром нагревании такого гидратированного силиката до 200 °C он разжижается и гидратная вода быстро превращается в пар. Вследствие большой вязкости расплавленно-

го силиката водные пары задерживаются в нем, образуя пузыри с тонкими стенками.

Результаты исследования по получению пористого заполнителя на основе жидкостекольных систем показали, что вспучивание начинается уже при 50 °С [4].

Для получения теплоизоляционного материала в настоящей работе использовались следующие компоненты:

1) товарное натриевое жидкое стекло плотностью 1,41 г/см<sup>3</sup> (см. ГОСТ 13075–81);

2) хлористый натрий (ГОСТ 13830–97, производства ОАО «Бассоль»), размолотый до размера менее 0,3 мм.

Исследования, проведенные в [1–3] показали, что наиболее эффективной добавкой является хлорид натрия, который приводит к коагуляции жидкого стекла, при этом ионы натрия понижают силикатный модуль смеси, а ионы хлора, действуя в качестве окислителя, способствуют коагуляции жидкостекольной смеси<sup>1</sup>. Выпадение осадков от прибавления NaCl обусловливается тем, что хлористый натрий непосредственно соединяется с щелочными силикатами жидкого стекла и образует нерастворимое соединение. Хлорид натрия способен вызывать равномерную по объему коагуляцию, приводящую к получению массы, способной формироваться в сырьевые гранулы заданного размера и сохранять приданную форму. Со снижением силикатного модуля понижается число силоксановых связей и существенно облегчается переход ионов щелочного металла в раствор, а также движение молекул воды в фазу стекла, что дает возможность формовать гранулы любого размера [1–4].

Физико-химические показатели жидкого стекла представлены в табл. 1.

Таблица 1  
**Физико-химические показатели  
жидкого стекла**

Показатели	
Содержание кремнезема	38,9 %
Содержание оксида натрия	10,63 %
Кремнеземистый модуль	3,0
Силикатный модуль	2,9
Плотность	1,45 г/см <sup>3</sup>

Таблица 2  
**Физико-механические характеристики  
теплоизоляционного материала**

Показатель	
Диаметр гранул	7–9 мм
Плотность в куске	0,23–0,25 г/см <sup>3</sup>
Насыпная плотность	80–100 кг/м <sup>3</sup>
Прочность при сжатии	0,080–0,085 МПа
Огнеупорность	850–950 °C

Коагулирование поваренной солью растворов жидкого стекла становится возможным только при условии наличия модуля выше двух. Здесь обнаруживаются различные варианты отношения компонентов. Для высокомолекулярного стекла (например, 3,5) можно подобрать такую концентрацию NaCl, что выпавший вначале желатинообразный осадок после перемешивания исчезает и раствор становится более плотным, чем до прибавления поваренной соли.

Количество вводимого хлорида натрия влияет на свойства композиции. При добавлении хлорида натрия в количестве менее 5–8 % вязкость композиции изменяется незначительно, что затрудняет возможность сформовать гранулы [1–3]. При добавлении хлорида натрия более 30 % из-за повышенной вязкости композиции она становится малоформуемой.

<sup>1</sup> Пат. 2362749. С1 C04B 14/24. Композиция для производства пористого заполнителя / Д.Ю. Денисов, И.В. Ковков, В.З. Абдрахимов, Л.В. Журавель. Заявл. 13.12.2007; Опубл. 27.07.2009; Бюл. № 21.

Оптимальное количество вводимого хлорида натрия должно составлять 10–15 %.

Для формования гранулированного материала на основе жидкого стекла желательно использовать только пластичное состояние [1–3]. Технологический процесс пластической обработки формования жидкостекольной массы имеет цель — образование такой коагуляционной структуры, которая может служить основой для получения теплоизоляционных материалов.

Процесс гидратирования стекловидных щелочных силикатов основан на их способности присоединять при определенных условиях воду.

Растворение стекла является особым физико-химическим процессом, не похожим на процессы растворения обычных неорганических электролитов (кислот, щелочей, солей). Процесс это очень сложный и состоит из отдельных стадий, идущих друг за другом в следующем схематическом порядке [4]:

1) гидратация — присоединение к составным частям растворимого стекла воды с образованием гидратных соединений и соединений, не имеющих определенного химического состава. Гидратация сопровождается набуханием и некоторым положительным тепловым эффектом;

2) первоначальное растворение, заключающееся в переходе в раствор образовавшихся гидратных соединений. Легкость и полнота растворения зависят от содержания в силикате кремнезема;

3) гидролиз — неизбежный процесс расщепления силиката под действием воды с образованием свободной едкой щелочи. Чем выше содержание  $\text{SiO}_2$ , тем труднее протекает гидролиз;

4) пептизация — коллоидное растворение гидролитической едкой щелочью кремнезема, образующегося вследствие разложения сложного комплекса растворимого стекла, особенно при молекулярном отношении  $\text{Na}_2\text{O} : \text{SiO}_2$ , больше двух;

5) электролитическая диссоциация перешедших в раствор силикатов с образованием простых и сложных ионов, а также комплексных и ионизированных мицелл.

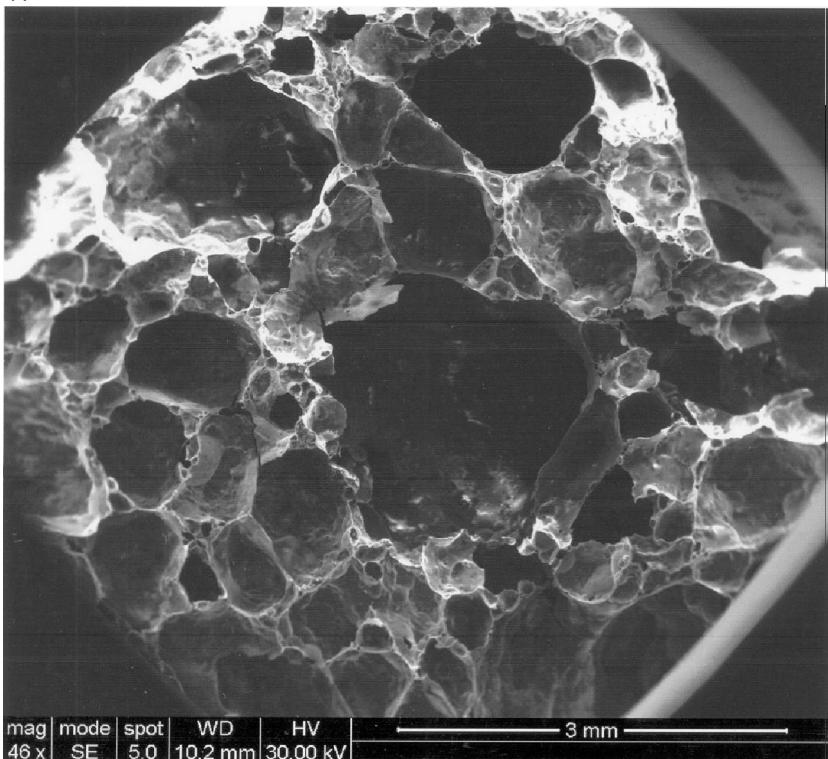
Перемешивание производилось до получения однородной массы. Затем из модифицированной жидкостекольной композиции системой ножей разрезали и получали отдельные гранулы (диаметром 7–9 мм), которые при температуре 350 °C вспучивали в тарельчатом грануляторе, встроенным в лабораторную печь. Характеристики шарообразных гранул представлены в табл. 2, из которой видно, что из жидкого стекла, модифицированного хлоридом натрия, при относительно невысокой температуре обжига можно получить легкий пористый заполнитель.

Пористость материала составляет в среднем 90–95 %, макроструктура ячеистая. Большое количество химически связанной воды и быстрый нагрев способствуют получению крупнопористой структуры и низкой средней плотности. Медленный нагрев сопровождается интенсивной потерей воды и слабым вспучиванием. Теплопроводность наиболее легких материалов составляет 0,028–0,035 Вт/(м · °C).

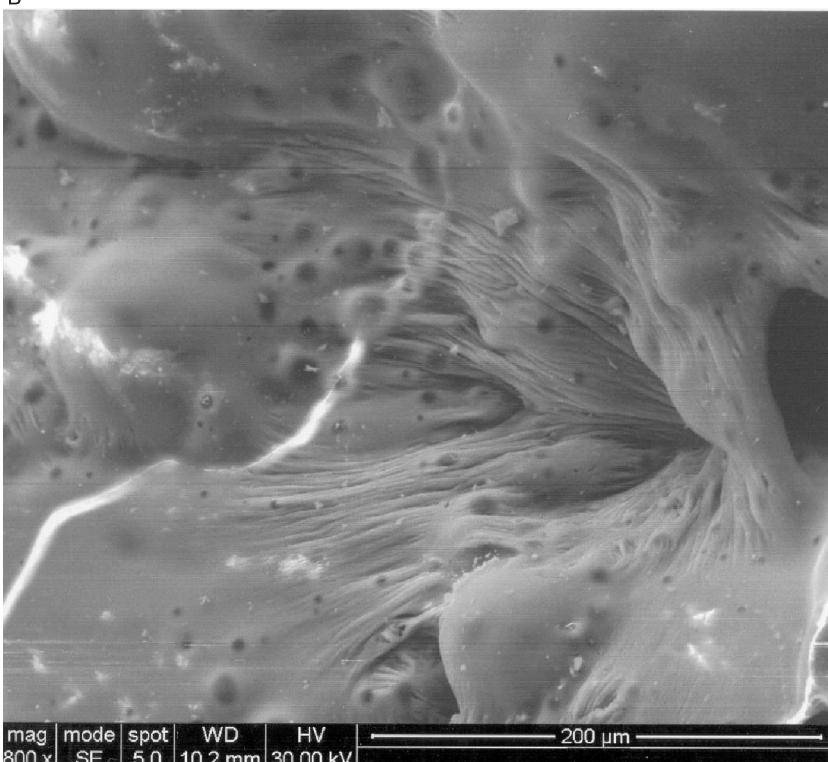
Низкая температура вспучивания жидкостекольных материалов (ниже 500 °C) положительно отличает их от всех известных минеральных обжиговых материалов.

Для исследования структуры исследуемых образцов был использован метод растровой микроскопии. Электронный растровый сканирующий микроскоп PHILLIPS 525M с детектором EDAX 900 применяется для наблюдения и фотографирования микрорельефа поверхности в режиме вторичных электронов. На рис. 1 представлены фотографии поверхности

A



Б



*Rис. 1.* Электронное фото поверхности скола (А); стеклофаза внутренней части исследуемого теплоизоляционного материала (Б).  
Увеличение: А×46; Б×800

скола (рис. 1, А) и стеклофаза внутренней части (рис. 1, Б) исследуемого теплоизоляционного материала.

Метод скола основан на допущении, что в тонкозернистом материале раскол проходит по индукционной поверхности, и, следовательно, наблюдаемый микрорельеф скола отражает структуру образующегося вещества [2]. Опыт исследования тонких разностей аморфных и кристаллических пород показал правильность указанного допущения: сейчас уже нет необходимости говорить о значении метода.

Термообработанные гранулы при 350 °С имели плотную сплошную корочку и внутреннюю высокопористую структуру. Строение гранулы аналогично керамзитовой, но толщина корочки значительно меньше (рис. 1, А).

Предварительное травление поверхности свежего скола 3 % HF показало, что стекло претерпело интенсивную ликвацию и разделилось на капельную фазу и матрицу (рис. 1, Б) [2].

Капли имеют сложную, но преимущественно округлую форму и размеры от долей до 3 мкм, которые сильно зависят от температуры термообработки.

Некоторые крупные капли имеют форму шара и располагаются на значительных расстояниях друг от друга. По мнению авторов работ, такие капли встречаются сравнительно редко<sup>2,3</sup>. Чаще при электронно-микроскопическом изучении стеклофазы фиксируется ликвационная структура с весьма малыми размерами капель (0,03–0,05 мкм) и их более тесным расположением (рис. 1, Б).

В области низких температур стеклообразное состояние метастабильно. При нагревании стекло стремится перейти в термодинамически устойчивое состояние, что может быть достигнуто в результате фазового разделения. Фазовое разделение осуществляется путем кристаллизации или ликвации стекла<sup>4</sup>. Вследствие высокой вязкости стекломассы процессы фазового разделения не достигают полного завершения и в материале обычно после фазового разделения сосуществуют по меньшей мере две фазы: кристаллическая и стекловидная — при кристаллизации; две стекловидной — при ликвации<sup>4</sup>. Неоднородность структуры и химического состава вещества приводит к расслоению и вспучиванию расплава.

Как правило, в стеклах чаще всего встречаются три вида ликвации: остаточная, дендритная и зональная (бывают обратная, осевая и др.). Дендритная ликвация проявляется в микрообъемах сплава, близких к размеру зерен, а зональная наблюдается во всем объеме вещества. При дегидратной ликвации расплав склонен к интенсивному газопоглощению и окислению, в результате чего происходит вспучивание.

На рис. 1, Б видно, что в правой части стеклофаза сопровождается расплыванием, т.е. уменьшением концентрации капель и потерей ими четких контуров. Подобную ликвационную структуру можно условно назвать остаточной<sup>2</sup>.

Основным условием, обеспечивающим вспучивание жидкостекольных систем при их нагревании, является совмещение во времени пиропластического состояния с интенсивным паровыделением внутри термообрабатываемого материала [4]. Каждый из этих факторов в отдельности

<sup>2</sup> Грум-Гржимайло О.С., Квятовская К.К. Механизм формирования глушителя в борно-циркониевых глазурях // Тр. ин-та НИИстройкерамики. 1979. Вып. 44. С. 127–145.

<sup>3</sup> Павлов В.Ф. Физико-химические основы обжига изделий строительной керамики. М.: Стройиздат, 1977. 272 с.

<sup>4</sup> Павлушкин Н.М. Химическая технология стекла и ситаллов. М.: Стройиздат, 1983. 432 с.

еще не обеспечивает возникновение процесса вспучивания. Необходимо, чтобы они действовали одновременно.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А б д р а х и м о в, В.З. Использование жидкого стекла и техногенного сырья в производстве огнеупорных водостойких теплоизоляционных материалов [Текст] / В.З. Абдрахимов, В.К. Семенычев, И.В. Ковков, Д.Ю. Денисов, В.А. Куликов, Е.В. Вдовина // Огнеупоры и техническая керамика. — 2011. — № 3. — С. 30–35.
2. А б д р а х и м о в, В.З. Исследование фазового состава теплоизоляционных материалов на основе твердых солевых шлаков и жидкого стекла [Текст] / В.З. Абдрахимов // Изв. вузов. Строительство. — 2008. — № 11-12. — С. 33–39.
3. А б д р а х и м о в, В.З. Теоретические и технологические аспекты использования техногенного сырья в производстве теплоизоляционных материалов [Текст] / В.З. Абдрахимов, Д.Ю. Денисов. — Самара : Самар. акад. гос. и муницип. управления, 2010. — 72 с.
4. Г р и г о р ѿ в, П.Н. Растворимое стекло [Текст] / П.Н. Григорьев, М.А. Матвеев. — М. : Стройиздат, 1956. — 443 с.

*ДЕНИСОВ Денис Юрьевич, асп.; E-mail: denisovdj@mail.ru*

*Самарская академия государственного и муниципального управления*

*АБДРАХИМОВ Владимир Закирович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: 3375892@mail.ru*

*Самарская академия государственного и муниципального управления*

Получено после доработки 25.10.11

**Denisov Denis Yurjevich**, post-graduate student; E-mail: denisovdj@mail.ru, Samara Academy of State and Municipal Steering, Russia

**Abdrahimov Vladimir Zakirovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: 3375892@mail.ru, Samara Academy of State and Municipal Steering, Russia

#### TO THE PROBLEM OF USE FLUIDGLASS OF COMPOSITIONS IN MANUFACTURE OF HEAT INSULATORS

The main condition ensuring a swelling fluidglass of systems at their calefaction, overlapping time plastic conditions with intensive fallow secretion inside heat treatment a material is. Each of these factors separately yet does not ensure originating process of a swelling. It is necessary, that they acted simultaneously.

**Key words:** fluidglass compositions, porous heat insulators, soluble glass, the phase diagram, Sodium chloridum, heat treatment, a porosity, the drip phase, a template.

#### REFERENCES

1. А б д р а х и м о в, В.З. Use of water glass and technogenic raw material in manufacture of refractory waterproof heat insulators [Text] / V.Z. Abdrahimov, V.K. Semenychev, I.V. Kovkov, D.Yu. Denisov, V.A. Kulikov, E.V. Vdovina // Refractories and engineering ceramics. — 2011. — N 3. — P. 30–35.
2. А б д р а х и м о в, В.З. Probe of phase structure of heat insulators on the basis of solid salt slags and water glass [Text] / V.Z. Abdrahimov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2008. — N 11-12. — P. 33–39.
3. А б д р а х и м о в, В.З. Theoretical and Technological Aspects of Use of Technogenic Raw Material in Manufacture of Heat Insulators [Text] / V.Z. Abdrahimov, D.Yu. Denisov. — Samara : Samara Academy of State and Municipal Steering, 2010. — 72 p.
4. Г р и г о р ѿ в, П.Н. Soluble Glass [Text] / P.N. Grigoryev, M.A. Matveev. — М. : Stroyizdat, 1956. — 443 p.

# ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 624.132.3:621.878:62-52

В.П. АВДЕЕВ, А.Д. КОНОНОВ, А.А. КОНОНОВ, Н.А. ВАРДАНЯН

## ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ НЕКОТОРЫХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО ГРУНТА ДЛЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ РАБОЧИМИ ПРОЦЕССАМИ ЗЕМЛЕРОЙНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Рассматриваются основы построения и один из вариантов технической реализации поляризационного датчика для определения свойств грунта, разрабатываемого отвалом землеройно-транспортной машины.

Ключевые слова: землеройно-транспортные машины, разработка грунта, свойства грунта, техническая реализация измерений.

В работах [1, 2] рассмотрены возможности получения информации о некоторых электрических и физико-механических свойствах грунта, полезной при автоматизации [3] землеройно-транспортных машин (ЗТМ), и показано [4], что целесообразно использовать радиоволновый метод, основанный на излучении сигналов с вращающейся поляризацией и соответствующей обработке отраженного от разрабатываемого грунта сигнала поляризационно-фазовой системой с ортогональными каналами.

Для оценки возможности применения одного из вариантов технической реализации поляризационного измерителя некоторых физико-механических свойств разрабатываемого грунта для системы автоматического управления рабочими процессами землеройно-транспортных машин (на примере автогрейдера) необходимо рассмотреть следующие вопросы: выбор диапазона рабочих частот поляризационного датчика, установка датчика на ЗТМ, оценка точности измерений.

Выбор диапазона рабочих частот поляризационного датчика может быть осуществлен, исходя из следующих ограничений: 1) длина волны должна быть значительно меньше размеров и главных радиусов кривизны облучаемой грунтовой поверхности и 2) больше размеров отдельных частиц грунта, чтобы отражение можно было считать близким к зеркальному.

Этим двум условиям удовлетворяет сантиметровый диапазон сверхвысоких частот (СВЧ). В частности, в натурных испытаниях измерение свойств грунта осуществлялось на частоте 9630 МГц в 3-сантиметровом диапазоне длин волн ( $\lambda \approx 3,2$  см). Отметим, что использование волн СВЧ диапазона с длиной  $\lambda = 8$  мм позволяет построить компактный поляри-

метр, но в этом диапазоне заметнее сказываются эффекты диффузного рассеяния, что может отразиться на качестве автоматического управления ЗТМ.

С точки зрения установки датчика свойств грунта на ЗТМ рассмотрим совмещенное радиолокационное измерение и разнесенный прием.

При совмещенном радиолокационном измерении достоинством является компактность и в связи с этим высокая технологичность датчика некоторых физико-механических свойств грунта. Такой поляриметр может быть удобно закреплен, например, в верхней части рамы автогрейдера, где он менее подвержен повреждениям, но в этом случае изменение положения отвала несколько меняет структуру и характеристики поля отраженного от грунта сигнала, что может вносить некоторую погрешность в измерения.

При радиолокационном измерении передающая и приемная антенны пространственно совмещены и технически возможны два случая: излучение зондирующего сигнала и прием отраженного колебания осуществляются с помощью одной антенны или антенные системы находятся в непосредственной близости друг от друга.

Оба варианта имеют некоторые недостатки. В первом варианте — это сложность радиосистемы стробирования импульсов зондирующих и отраженных колебаний. Во втором — необходимость достижения высокого уровня развязки (40–60 дБ) приемного и передающего трактов двухканальной поляризационно-фазовой системы, которой достаточно сложно добиться на работающей ЗТМ. При установке измерителя на автогрейдер с излучением зондирующего сигнала вертикально вниз появляется общий недостаток указанных вариантов построения — снижение информативности измерений, так как при малых углах падения деполяризация сигнала, обусловленная изменением структурных свойств грунта, уменьшается.

Ниже предлагается вариант технической реализации датчика некоторых физико-механических свойств грунта, который может использоваться при разнесенном приеме, например, в случае, когда излучающая и принимающая антенны пространственно разнесены и находятся позади основного отвала. В этом варианте установки срез грунта за отвалом в достаточной мере соответствует модели гладкой рассеивающей поверхности раздела двух сред, используемой в теоретических расчетах, что приводит к повышению точности работы аппаратуры. Следует отметить, что возможное (в частности, из-за такого способа расположения датчика) неполное соответствие измеряемых величин абсолютным значениям характеристик разрабатываемого грунта не снижает качество автоматического экстремального управления ЗТМ, так как при выработке управляющего воздействия оперируют относительными величинами [3].

Излучатель и приемник закрепляются на ребрах жесткости с направляющими для ползунов кронштейнов отвала автогрейдера и весь измеритель поворачивается вместе с отвалом (рис. 1). Такой способ установки поляриметра приводит к необходимости получить узкую диаграмму направленности приемно-передающих антенн, что представляет собой непростую задачу при ограниченных размерах апертуры антенных систем, которая решается эмпирически подбором геометрии рупоров антенн с анализом распределения поля в раскрыве антennы с помощью поляризационного калибратора<sup>1</sup>. Кроме того, в качестве недостатка можно указать искажение формы диаграмм направленности приемно-передаю-

<sup>1</sup> Гусев К.Г., Филатов А.Д., Сополов А.П. Поляризационная модуляция. М.: Сов. радио, 1974. 288 с.

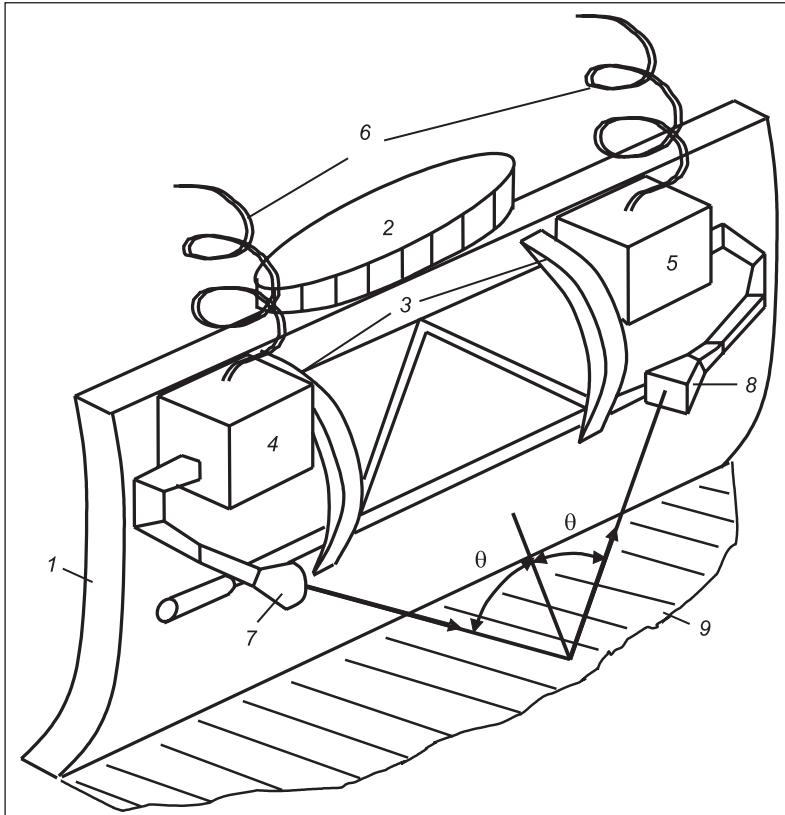


Рис. 1. Схема расположения поляризационного датчика

1 — отвал; 2 — поворотный круг; 3 — ребра жесткости; 4 — передатчик; 5 — приемник; 6 — коаксиальный фидер; 7 — передающая антenna; 8 — принимающая антenna; 9 — обрабатываемая поверхность

щих антенн из-за влияния близко расположенных металлических поверхностей (отвал). Однако при жестком креплении излучателя и приемника эти искажения могут быть учтены как постоянные составляющие, присутствующие в процессе измерений.

Достоинством закрепления поляриметра на ребрах жесткости отвала можно считать достаточную стабильность функционирования из-за поддержания постоянства углов облучения и приема.

При проверке качества работы системы автоматического управления рабочим органом [3] на автогрейдере ДЗ-98 (Челябинского производства с двигателем ЯМЗ-240Г при отключенных передних ведущих колесах) с предложенным вариантом технической реализации датчика некоторых физико-механических свойств разрабатываемого грунта, на основе предварительно проведенных лабораторных исследований было использовано излучение циркулярно-поляризованной волны с правым направлением вращения вектора поля на частоте 9630 МГц с углом падения  $\theta \approx 35^\circ$ ; а прием осуществлялся поляризационно-фазовой системой, измеряющей интенсивности поляризационно-ортогональных компонент в ортогонально-круговом базисе [4].

Излучатель представляет собой устройство для преобразования линейно поляризованной волны от генератора СВЧ (ГСВЧ) или кластрона в волну с врачающейся поляризацией с четвертьволновой диэлектрической пластинкой в круглом волноводе. Это волноводное устройство с помощью переходной секции с прямоугольного сечения на круглое присое-

диняется к выходу ГСВЧ или клистрона. Пластина в круглом волноводе устанавливается под углом  $45^\circ$  к вектору поля  $E$  в прямоугольном волноводе (рис. 2). На пластине вектор  $E$  раскладывается на две ортогональные составляющие, одна из которых  $E_x$  ориентирована по пластине, а другая  $E_y$  — по нормали к ней. Составляющая  $E_y$ , проходя через секцию

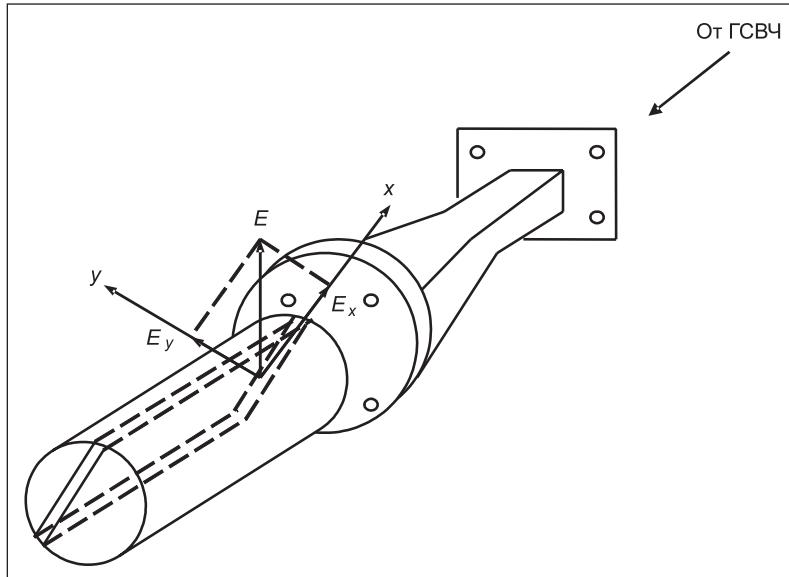


Рис. 2. Получение волны эллиптической поляризации с помощью круглой волноводной секции с четвертьвольновой пластинкой

с пластиной, никаким изменениям не подвергается, если пренебречь некоторым (обычно очень незначительным) затуханием, а составляющая  $E_x$ , ориентированная по пластине, будет претерпевать задержку по фазе, величина которой зависит от длины и толщины пластины. Размеры пластины подбираются такими, чтобы эта составляющая при распространении вдоль пластины задерживалась по фазе относительно компоненты  $E_y$  на  $90^\circ$ . Так, длина  $L$  фазовращающей диэлектрической пластины рассчитывается на основании<sup>1</sup>, а в целом форма и размеры пластины, обеспечивающей необходимый фазовый сдвиг при весьма малом отражении, подбираются экспериментально. В пластине, применяемой в данной установке, для уменьшения отражений сделаны четвертьволновые вырезы и грани (рис. 3), перпендикулярные направлению распространения волны, выполнены в виде клина. Эта пластина дает сдвиг фазы между ортогональными составляющими, равный  $\pi/2$  при характерных размерах  $L = 55$  мм,  $l = 10$  мм,  $m = 8$  мм,  $t = 6$  мм. В результате на выходе секции с пластиной будет иметь место круговая поляризация. В зависимости от того, как ориентирована пластина относительно вектора  $E$  (под углом  $45^\circ$  или  $-45^\circ$ ), будет иметь место круговая поляризация правого или левого вращения вектора поля.

Пластина поляризатора по форме может быть различной и выполняться из материала с малыми потерями (например, фторопласт, полистирол, слюда и т.д.). В эксперименте использовалась фторопластовая пластина, допускающая достаточно большие мощности излучения.

В качестве излучающей антенны использовался круглый рупор с конусным раскрывом, который отличается простотой конструкции, отсутствием критической настройки и дает возможность получить острую на-

правленность в широком диапазоне частот. Потери в антенне за счетстыковки ее с волноводом, а также за счет неоднородности, которая имеется в раскрытии (там, где волны выходят в пространство), малы, так как диаметр конуса (в данном случае 60 мм) значительно больше половины длины волны, которая излучается антенной.

Возбуждение рупора осуществляется с помощью квадратного волновода. Подобное устройство является широкодиапазонным, поскольку в нем осуществляется трансформация направленных волн.

Для принятия отраженной от грунта электромагнитной волны произвольной поляризации и для измерения поляризационных параметров необходимо анализирующее устройство, которое содержит кроме приемной рупорной антенны с круглым или квадратным раскрытием ( $60 \times 60$  мм) анализатор вида поляризации волны (рис. 4), позволяющий одновременно разложить анализируемую волну на ортогональные компоненты в круговом и линейном базисах в волноводном тракте.

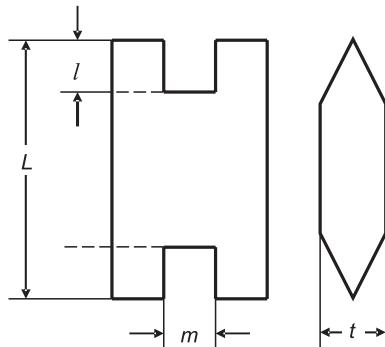


Рис. 3. Четвертьволловая диэлектрическая фазовращающая пластина

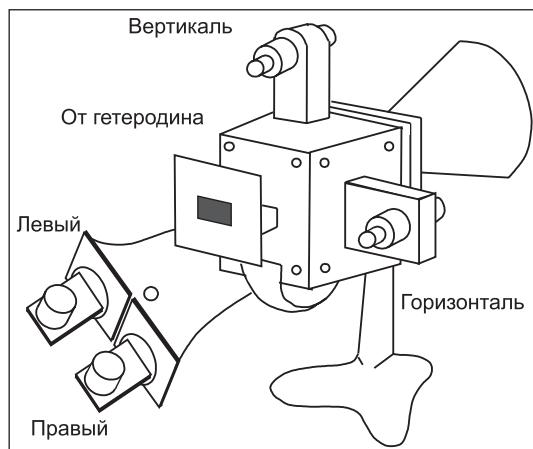


Рис. 4. Вид четырехкомпонентного разделителя поляризации

В четырехкомпонентном разделителе поляризации трехканальное турниконое соединение дополняется квадратурным гибридным соединением с разновидностью короткой щели, которое для удобства сочленения с волноводным трактом повернуто на  $90^\circ$  относительно ортогональных волноводных каналов турникета. В данном разделителе принимаемая мощность делится пополам. Половина приходится на ортогональные линейно поляризованные компоненты, а другая — на поляризованные по кругу составляющие.

Проведенные натурные экспериментальные исследования показали, что точность измерения поляризационных параметров, излучаемых и принимаемых после отражения от грунта электромагнитных волн, определяется в основном точностью калибровки анализатора поляризации.

Среднеквадратичная погрешность калибровки узлов измерительного тракта по амплитудным поляризационным параметрам в пределах их реального измерения равнялась 3,5 %. В данном случае колебания частоты генератора СВЧ находились в пределах 5 МГц. Этот предел изменения частоты для системы автоматизации вполне можно считать допустимым.

Погрешность измерения коэффициента эллиптичности волны по полу составляла  $\Delta k = 0,008 - 0,04$ . Погрешность измерения угла ориентации поляризационного эллипса в пространстве не превышает  $2^\circ$ .

Система [3] показала достаточно стабильное автоматическое управление процессом разработки грунта основным отвалом автогрейдера ДЗ-98. Результаты обработки измеренных параметров поляризации использовались для оперативной корректировки работы системы автоматического управления рабочим органом ЗТМ, полезной для уточнения уровня опорных сигналов при достаточно широком диапазоне изменения грунтовых условий. Так, например, при значительном повышении влажности грунта специфика устройства радиоволнового датчика объема грунта [3] может привести к излишне раннему преобладанию измеренного информационного параметра над опорным сигналом, следовательно, в этом случае уровень опорного сигнала по объему грунта должен быть скорректирован в сторону повышения.

Проведенные исследования могут быть полезны специалистам, работающим в области совершенствования, эксплуатации и автоматизации ЗТМ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аникеенко, Г.Н. Экспериментальное определение характеристик рассеяния поверхностей раздела некоторых материальных сред [Текст] / Г.Н. Аникеенко, А.А. Кононов // Сб. докл. VI Междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь». — Воронеж, 2000. — Т. 2. — С. 1206–1211.
2. Устинов, Ю.Ф. Методологические основы экспериментального определения некоторых физико-механических свойств разрабатываемого грунта [Текст] / Ю.Ф. Устинов, А.Д. Кононов, А.А. Кононов // Изв. вузов. Строительство. — 2005. — № 11–12. — С. 109–113.
3. Кононов, А.А. Проблема автоматизации рабочих процессов землеройно-транспортных машин [Текст] / А.А. Кононов, В.Н. Аникин // Сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах». — Брянск, 2009. — Т. 2. — С. 104–109.
4. Устинов, Ю.Ф. Методы измерения некоторых физико-механических свойств разрабатываемого грунта при автоматическом управлении рабочими процессами землеройно-транспортных машин [Текст] / Ю.Ф. Устинов, А.Д. Кононов, А.А. Кононов и др. // Изв. вузов. Строительство. — 2008. — № 5. — С. 62–67.

*АВДЕЕВ Виктор Петрович, д-р техн. наук, проф.*

*Воронежский государственный архитектурно-строительный университет  
КОНОНОВ Александр Давыдович, канд. физ.-мат. наук, доц.*

*Воронежский государственный архитектурно-строительный университет  
КОНОНОВ Андрей Александрович, д-р техн. наук; E-mail: kniga16@mail.ru*

*Воронежский государственный архитектурно-строительный университет  
ВАРДАНЯН Нара Арташесовна, асп.*

*Воронежский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 29.09.11

**Avdeev Viktor Petrovich**, doctor of technical sciences, professor, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Kononov Alexandre Davydovich**, candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Kononov Andrey Alexandrovich**, doctor of technical sciences; E-mail: kniga16@mail.ru, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Vardanyan Nara Artashesovna**, post-graduate student, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**ENGINEERING EMBODYING  
OF A POLARIZATION METER OF SOME PHYSICAL  
AND MECHANICAL CHARACTERISTICS  
OF A DEVELOPED GROUND FOR  
AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM BY WORKING PROCESSES  
OF MOTORGRADERS, SCRAPERS AND BULLDOZERS**

Are considered a fundamentals of build-up and one of versions of engineering embodying of a polarization transmitter for definition of properties of a ground developed by dump of the motorgraders, scrapers and bulldozers.

**Key words:** motorgraders, scrapers and bulldozers, development of a ground, property of a ground, engineering embodying of measurings.

REFERENCES

1. Anikeenko, G.N. Experimental Definition of Performances of a Dispersion of Interfaces of Some Material Mediums [Text] / G.N. Anikeenko, A.A. Kononov // The Collection of the Reports VI of Intern. Technological Conference «Radiolocation, Navigating, Link». — Voronezh, 2000. — Vol. 2. — P. 1206–1211.
  2. Ustinov, Yu.F. Methodological fundamentalses of experimental definition of some physical-mechanical characteristic of a developed ground [Text] / Yu.F. Ustinov, A.D. Kononov, A.A. Kononov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2005. — N 11–12. — P. 109–113.
  3. Kononov, A.A. A Problem of Automation of Working Processes of Motorgraders, Scrapers and Bulldozers [Text] / A.A. Kononov, V.N. Anikin // The Collection of Materials of Intern. Scientific-practical Conference «Problems the Off-the-shelf Biosphere-compatible of a Socio Economic Development in Building, Housing-municipal and Road Complexes». — Bryansk, 2009. — Vol. 2. — P. 104–109.
  4. Ustinov, Yu.F. Methods of measuring of some physical-mechanical characteristic of a developed ground at automatic control of working processes of motorgraders, scrapers and bulldozers [Text] / Yu.F. Ustinov, A.D. Kononov, A.A. Kononov et al. // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2008. — N 5. — P. 62–67.
-

**УДК 625.084:62-52**

**В.И. ИВАНЧУРА, А.П. ПРОКОПЬЕВ, Р.Т. ЕМЕЛЬЯНОВ, Т.Н. ПОЛЯКОВ**

## **МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДОРОЖНОГО КАТКА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ**

Рассматривается имитационная модель системы автоматического управления дорожного катка, построенная на основе нечеткой логики с учетом параметрической неопределенности процесса уплотнения. Приводятся результаты моделирования системы управления с применением программы MATLAB&Simulink.

**Ключевые слова:** дорожный каток, асфальтобетонная смесь, автоматическое управление, моделирование, нечеткая модель процесса уплотнения, нечеткий регулятор.

В дорожном строительстве широкое распространение получили вибрационные катки. Рабочий процесс вибрационного катка — это многократные воздействия вальцом (вальцами) на уплотняемый материал с повторяющимися проходами для достижения требуемой плотности асфальтобетонного покрытия. Уплотняемой среде (асфальтобетонной смеси) свойственна существенная нелинейность из-за непрерывного изменения характеристик при деформации упруговязкопластической среды, изменения температуры уплотняемого слоя во времени, процесса релаксации напряжений, температурной сегрегации и других факторов, что требует постоянного внимания со стороны оператора за режимами работы вибрационного катка. Обеспечение эффективной работы дорожных катков возможно только за счет автоматизации технологических процессов.

Зарубежные производители вибрационных катков предлагают автоматические системы управления (ACU) процессом уплотнения (Asphalt Manager фирмы Bomag), контрольно-измерительные системы (ACE — Ammann Compaction Expert, компании AMMANN) и другие ACU, адаптированные к своим типам вибрационных катков. По различным информационным источникам эти и другие аналогичные системы позволяют осуществлять непрерывный контроль за степенью уплотнения, настраивать амплитуду и частоту колебаний вальца в зависимости от скорости дорожного катка и температуры поверхности асфальтобетона. Ошибки в управлении дорожными катками приводят к неравномерному уплотнению, появлению дефектов, значительному уменьшению долговечности асфальтобетонного покрытия. Практика анализа готовых покрытий показывает наличие брака в среднем 65 % [1].

Производство дорожных катков предприятиями Российской Федерации растет. Так, ведущий производитель дорожных катков ОАО «РАСКАТ» (г. Рыбинск, URL: <http://www.raskat.yaroslavl.ru>) в 2010 г. выпустил 270 катков, увеличив объем продукции на 333,3 % в сравнении с 2009 г. Система управления качеством на ведущих предприятиях России сертифицирована на соответствие требованиям международного стандарта DIN EN ISO 9001:2000 [2], т.е. российские дорожные катки могут конкурировать с зарубежными по техническим и эксплуатационным характеристикам. Отличие дорожных катков отечественного производства от зарубежных состоит в отсутствии автоматических систем контроля и управления про-

цессом уплотнения [2]. Внедрению АСУ на дорожных катках в Российской Федерации препятствуют субъективные факторы — недостаточно высок уровень подготовки персонала [2], большая цена зарубежных АСУ — до 3 млн руб. (ACU Trimble GCS-900, URL: <http://www.geotehdv.ru/product/93/154>) при цене дорожного катка до 2 млн руб., отсутствие адаптации зарубежных АСУ на российские модели, а также отсутствие предложений отечественных заводов-изготовителей.

Необходимость выполнения научной работы по совершенствованию систем управления вибрационных катков определяется наличием нерешиенных научно-исследовательских задач теории рабочего процесса уплотнения среды, а также наличием научно-практических проблем обеспечения качества дорожных покрытий, зависящих от процессов дорожно-строительных машин.

Анализ свойств объекта управления предполагает разработку соответствующих адекватных статических и динамических моделей. Наибольшие трудности проявляются при идентификации нелинейного объекта. Такие задачи могут решаться на основе обработки экспериментальных данных или данных, полученных при решении дифференциальных уравнений с применением математических программных средств, таких как пакет программ MATLAB&Simulink.

Учитывая повышенный уровень сложности математического описания процесса уплотнения на основе априорной информации из-за нелинейности динамической системы объекта управления, стохастического изменения характеристик уплотняемой среды (возмущение), при разработке систем управления предпочтительным является использование технологий искусственного интеллекта. Известно [3], что традиционные ПИД-регуляторы имеют плохие показатели качества при управлении нелинейными и сложными системами, а также при недостаточной информации об объекте управления. Характеристики регуляторов в этих случаях можно улучшить с помощью методов нечеткой логики, нейронных сетей и генетических алгоритмов.

Учитывая особенности рассматриваемого объекта при разработке системы автоматического управления, целесообразно использовать аппарат нечеткой логики. Основу этого аппарата составляет математическая теория нечетких множеств, предложенная Л. Заде [4].

Научные публикации, посвященные рассматриваемому вопросу, имеют преимущественно обзорный характер. Так, в [5] рассмотрен принцип построения системы управления дорожных катков с применением блока нечетких выводов, обоснована структура и алгоритм управляющей системы.

Целью научной работы является разработка имитационной модели системы автоматического управления процессом уплотнения асфальтобетонной смеси вибрационным катком на основе нечеткой логики.

**Нечеткая модель процесса уплотнения.** Выбор нечеткого управления дорожным катком связан с особенностями уплотняемой среды. Асфальтобетонная смесь — упруговязкопластическая среда с изменяющимися параметрами во времени при уплотняющем воздействии на нее, т.е. характеризуется как стохастическая динамическая система. В публикациях<sup>1,2</sup> рассмотрена модель процесса уплотнения асфальтобетонной смеси вибрационным катком на основе системы дифференциальных уравнений.

<sup>1</sup> Пермяков В.Б., Дубков В.В., Серебренников В.С. Модель уплотнения асфальтобетонной смеси вибрационным катком // Изв. вузов. Строительство. 2008. № 10. С. 84–90.

<sup>2</sup> Клевцова О.Г., Иванчура В.И., Прокопьев А.П. Автоматизация процесса виброуплотнения дорожными катками // Материалы VI Всерос. конф. «Актуальные проблемы авиации и космонавтики». Красноярск: СибГАУ, 2010. С. 321–322.

При разработке нечеткого регулятора дорожного катка учитываются следующие параметры: температура уплотняемого слоя, скорость движения катка, статическая нагрузка на валец, частота и амплитуда вибраций вальца, масса вальца и катка в целом. На разных скоростях дорожного катка возможны различные диапазоны частоты колебания вальца для достижения оптимума по уплотнению. Машинист-оператор катка не всегда может выбрать оптимальное решение, не исключены и ошибки.

На рис. 1 представлена функциональная схема системы управления дорожного катка на основе нечеткой логики. Система управления предназначена для повышения качества управления, предупреждения неправильных команд оператора и согласования с целевой функцией управления и правилами. Блок нечеткого вывода выполняет функции контроллера действий оператора и выбора необходимого действия по управлению.

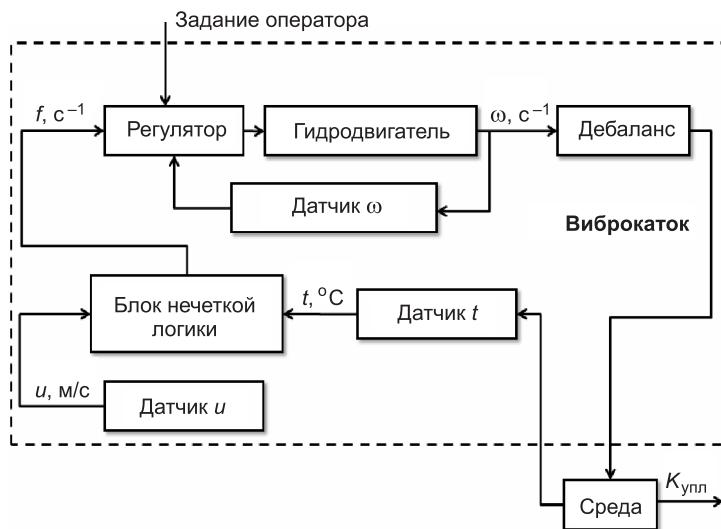


Рис. 1. Функциональная схема системы автоматического управления

Основная функция блока нечеткой логики — формирование задающего воздействия для регулятора вибрационного механизма уплотняющего вальца.

- Процедура обработки входной (четкой) информации в контроллере:
  - текущие значения входных переменных — скорости движения катка, температуры уплотняемого слоя преобразуются в лингвистические (фазифицируются);
  - на основании полученных лингвистических значений и с использованием базы правил контроллера производится нечеткий логический вывод, в результате которого вычисляются лингвистические значения выходных переменных;
  - заключительным этапом обработки является вычисление «четких» значений управляющих параметров — частоты вращения дебаланса (дефазификация).

**Разработка блока нечеткой логики.** Разработана модель регулирования частоты вращения вала гидродвигателя привода дебалансов вибрационного вальца дорожного катка с применением программы MATLAB&Simulink.

На рис. 2 представлена имитационная модель регулирования частоты вращения вала гидравлического привода вибрационного вальца.

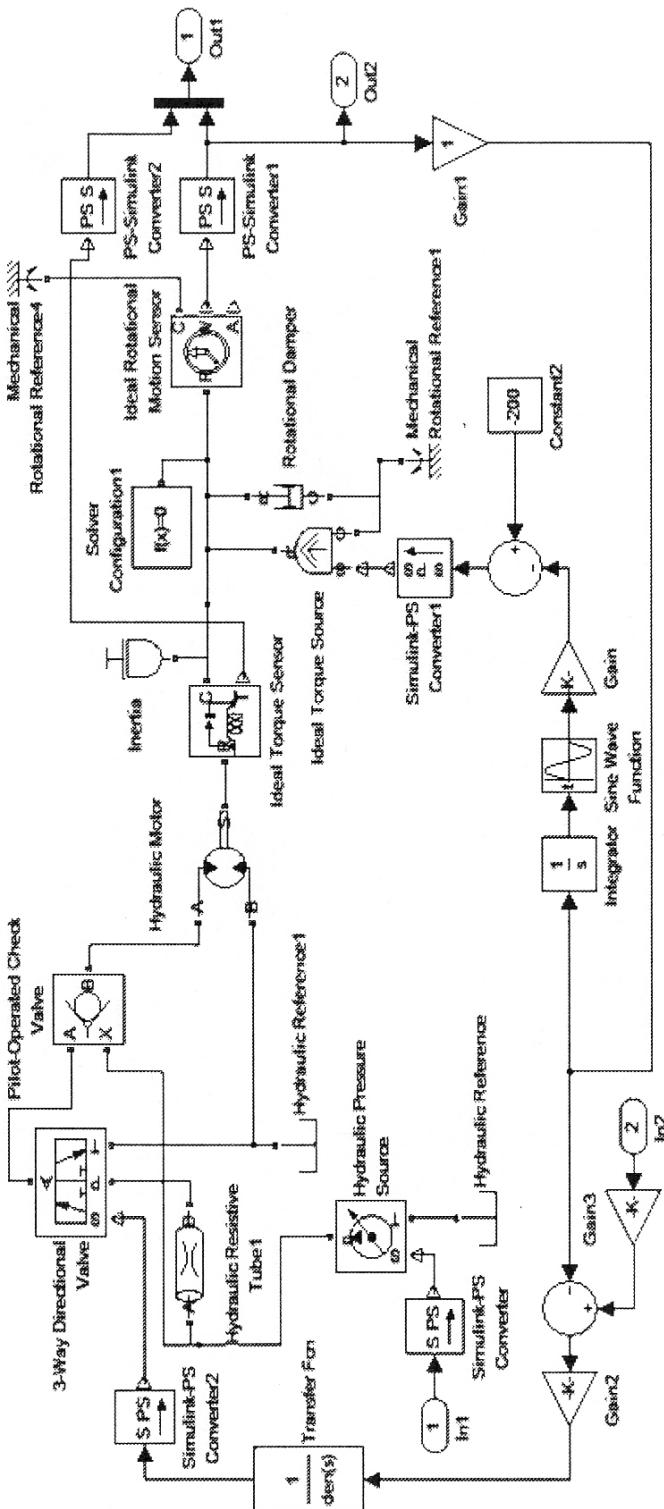


Рис. 2. Имитационная модель регулирования частоты вращения вала гидравлического привода вибрационного вальца

В настоящей работе применена нечеткая модель типа Мамдани, реализованная в пакете Fuzzy Logic Toolbox<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Штобба С.Д. Идентификация нелинейных зависимостей с помощью нечеткого логического вывода в системе MATLAB // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2003. № 2. С. 9–15.

В полях Range и Display Range установлен диапазон изменения и отображения переменной «temperatura» — от 60 до 85 °C, что соответствует температурному диапазону изменения асфальтобетонной смеси на завершающем этапе ее уплотнения. Для каждого из трех графиков, выделяя их по отдельности в верхней правой части экрана, имена и параметры: final(5.308 59.93); middle(5.308 72.3); begin(5.308 85). Аналогичные действия выполнены для переменной «skorost» с диапазоном от 0,4 до 1,8 м / с, предварительно изменив тип принадлежности на trimf, и именами и параметрами: up(0 0.25 0.55 0.9); forward(0.6 0.95 1.25 1.6); down(1.3 1.65 1.95 2.2).

Для выходной переменной «chastota» установлен сначала диапазон изменения от 10 до 50 Гц, далее задан для всех трех графиков тип принадлежности trimf с именами low, medium и high и параметрами (-6 10 26), (14 30 46) и (34 50 66) соответственно. Вид полученных графиков показан на рис. 3.

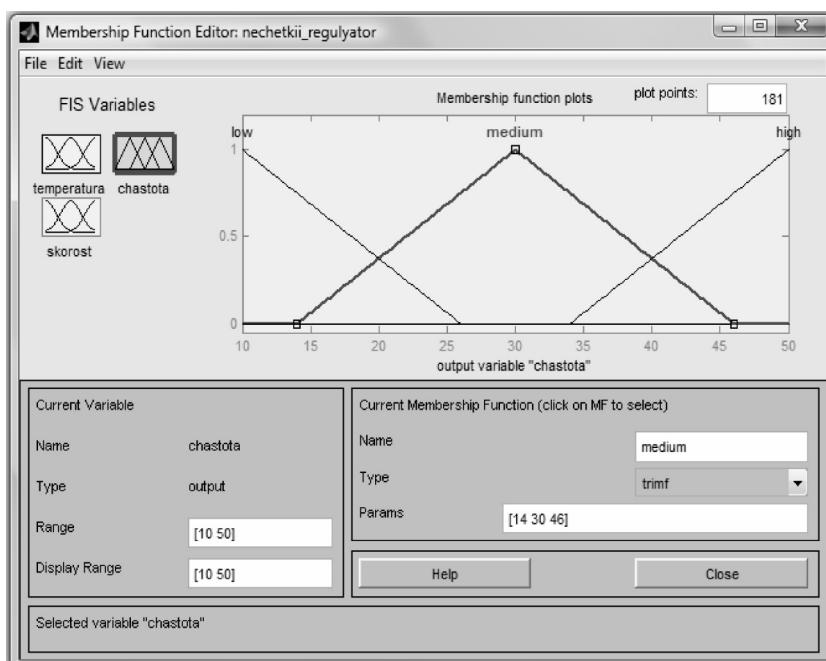


Рис. 3. Функция принадлежности переменной «chastota»

На следующем этапе определены правила, по которым будет работать блок нечеткой логики. Ввод правил основывается на двух утверждениях (рис. 4): с понижением температуры уплотняемого слоя частота вибрации вальца увеличивается; с повышением скорости движения катка частота вибрации увеличивается.

Зависимость выходного параметра от входных данных в виде графика представлена на рис. 5.

Модель системы, соответствующая описанной функциональной схеме (см. рис. 1), изображена на рис. 6. Модель гидропривода вибровальца представлена блоком SubsystemGidro, а модель уплотняемой среды — блоком Subsystem2nagr.

Моделирование проводилось с различными параметрами на входе для трех различных ситуаций: система без блока нечеткой логики (рис. 7, а); спуск катка с возвышенности — в момент времени, равный

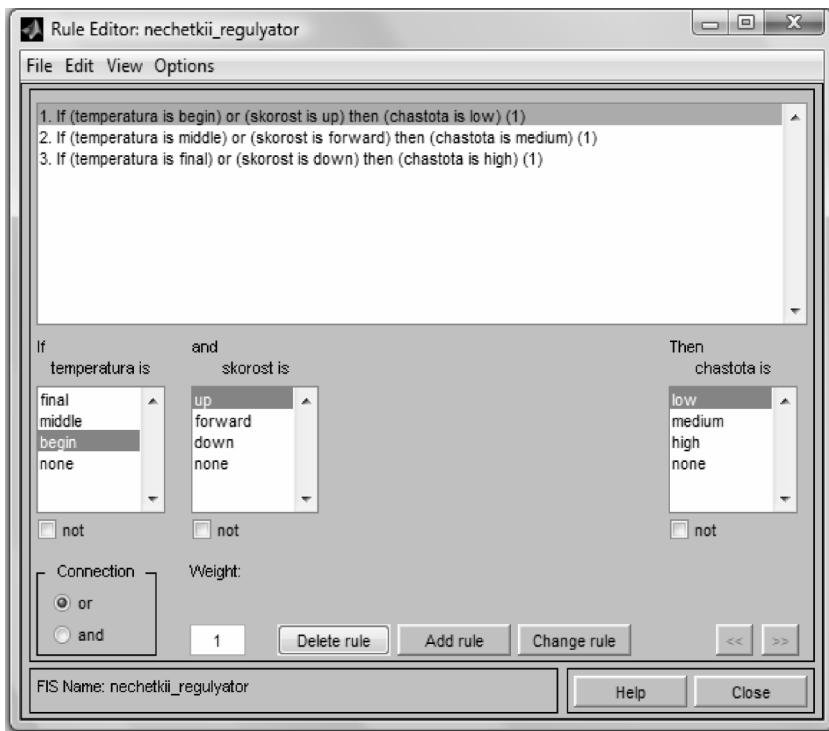


Рис. 4. Итоговый набор правил зависимости выходных параметров от входных, описанный в блоке нечеткой логики

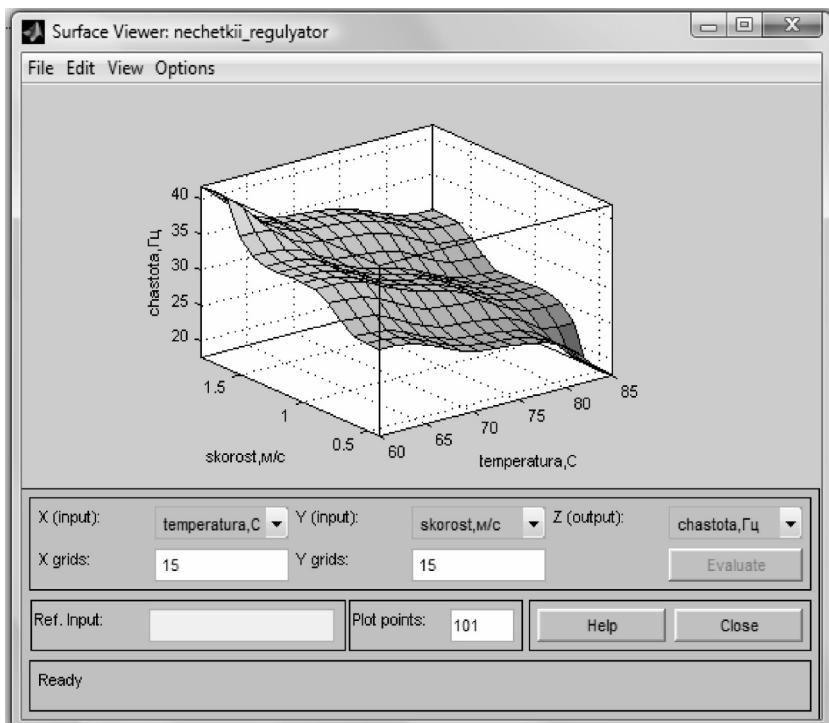


Рис. 5. Поверхность зависимости выходных параметров от входных в блоке нечеткой логики

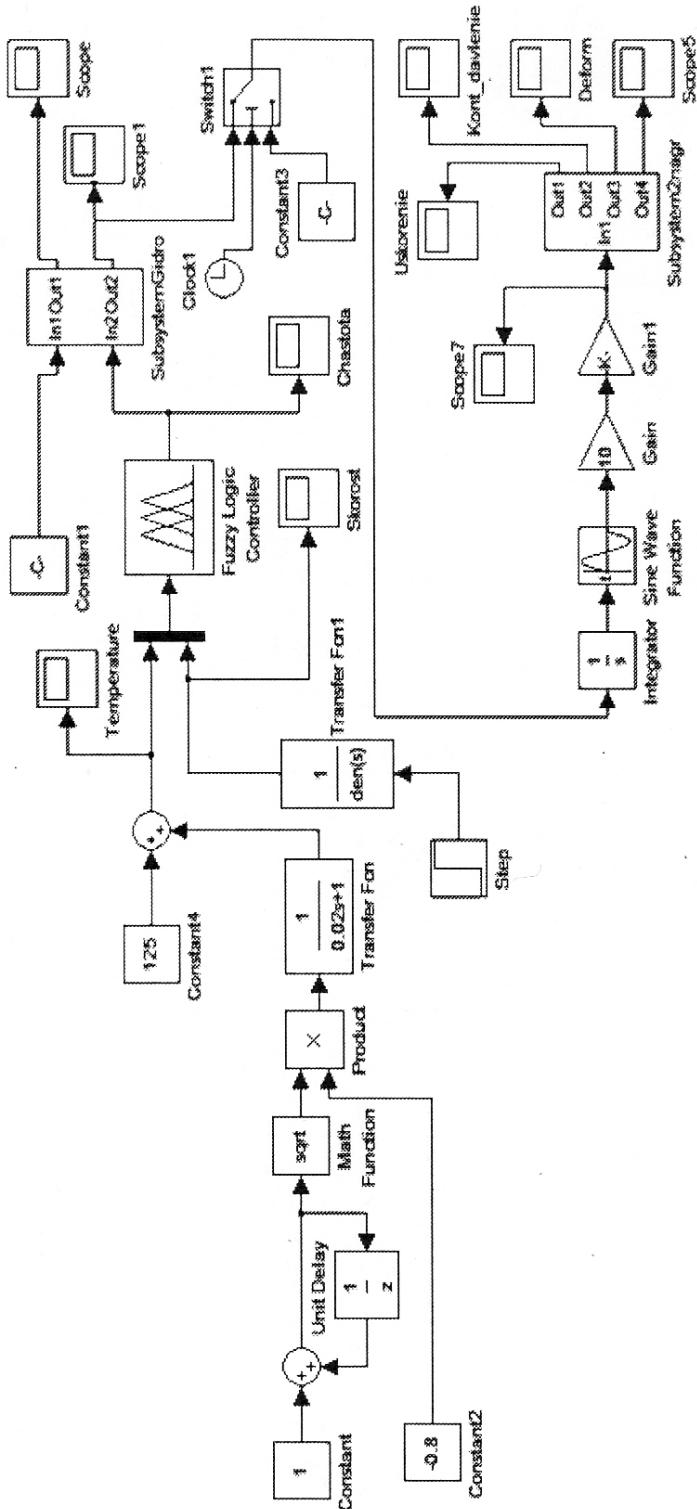


Рис. 6. Модель следящей системы автоматического управления с нечетким регулятором

1,5 с, скорость движения катка изменяется с 1,1 на 1,6 м/с, при этом также учитывается температура среды (рис. 7, б); подъем катка на возвышенность — в момент времени, равный 1,5 с, скорость движения катка изменяется с 1,6 на 1,1 м/с, при этом также учитывается температура среды (рис. 7, в).

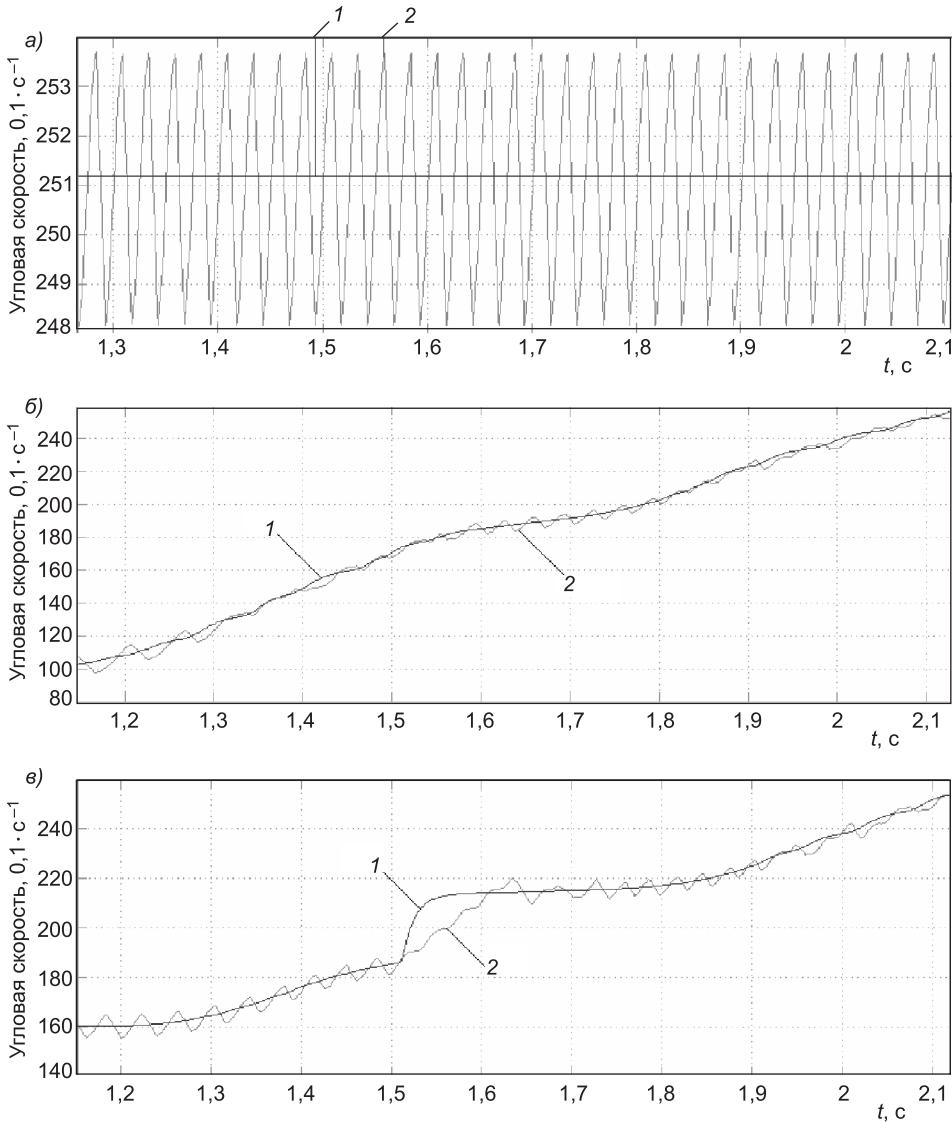


Рис. 7. Зависимости задаваемой на входе и получаемой на выходе частоты вращения вала гидромотора привода вибратора от времени

1 — сигнал на входе подсистемы; 2 — сигнал на выходе подсистемы

**Выводы.** В данной статье разработана имитационная модель системы автоматического управления дорожного катка на основе нечеткой логики. В имитационной модели подсистем учтены: гидравлический двигатель и элементы гидросистемы; реакция среды на воздействие со стороны вибрационного катка; блок нечеткой логики, учитывающий влияние изменения температуры уплотняемого слоя и скорость движения катка на частоту вибровозбуждения.

По результатам моделирования можно отметить преимущество системы с нечетким регулятором по сравнению с системой с классическим регулятором.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кустарев, Г.В. «Мозги» для катков — панацея или помощник? [Текст] / Г.В. Кустарев // Автомобильные дороги. — 2009. — № 9 (934). — С. 118–121.

2. Маслов, В. Лихие катки «Раскат» [Текст] / В. Маслов // Коммерческие автомобили + спецавтотранспорт. — 2010. — № 7–8. — С. 54–56.
3. Денисенко, В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации [Текст] / В.В. Денисенко // СТА. — 2006. — № 4–5. — С. 66–74.
4. Заде, Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений [Текст] / Л.А. Заде. — М. : Мир, 1976. — 176 с.
5. Максимычев, О.И. Автоматическое управление виброкатком с использованием нечеткой логики [Текст] / О.И. Максимычев // Изв. вузов. Строительство. — 2003. — № 4. — С. 85–87.

*ИВАНЧУРА Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф.*

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск*

*ПРОКОПЬЕВ Андрей Петрович, канд. техн. наук, доц.*

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск*

*ЕМЕЛЬЯНОВ Рюрик Тимофеевич, д-р техн. наук, проф.*

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск*

*ПОЛЯКОВ Тимофей Николаевич, инж.*

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск*

Получено после доработки 29.10.11

**Ivanchura Vladimir Ivanovich**, doctor of technical sciences, professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Prokopiev Andrey Petrovich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Emelianov Ryurik Timopheevich**, doctor of technical sciences, professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Poliakov Timofei Nikolaevich**, engineer, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

## **A MODEL OF AUTOMATIC CONTROL ROLLERS BASED ON FUZZY LOGIC**

A simulation model for the automatic control system of road roller, built on the basis of fuzzy logic based parametric uncertainty compaction process. Results of modeling the control system using the program MATLAB&Simulink.

**Key words:** road roller, asphalt mix, automatic control, simulation, fuzzy model of the compaction process, the fuzzy controller.

### REFERENCES

1. Кустарев, Г.В. «Мозги» для катков — панатсейя или помошchnик? [Text] / Г.В. Кустарев // Автомобильные дороги. — 2009. — № 9 (934). — С. 118–121.
2. Маслов, В. Лихие катки «Раскат» [Text] / В. Маслов // Коммерческие автомобили + спецавтотранспорт. — 2010. — № 7–8. — С. 54–56.
3. Денисенко, В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации [Text] / В.В. Денисенко // СТА. — 2006. — № 4–5. — С. 66–74.
4. Заде, Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений [Text] / Л.А. Заде. — М. : Мир, 1976. — 176 с.
5. Максимычев, О.И. Автоматическое управление виброкатком с использованием нечеткой логики [Text] / О.И. Максимычев // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2003. — № 4. — С. 85–87.

## САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.34 : 697.444

Т.А. РАФАЛЬСКАЯ

### ОСОБЕННОСТИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ СИСТЕМ ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ НАРУЖНОГО ВОЗДУХА

Регулирование нагрузки горячего водоснабжения только по температуре горячей воды вызывает нарушения работы системы отопления и завышенную температуру обратной воды в тепловой сети при высоких температурах наружного воздуха. Определены зависимости для задания программы регулирования расхода сетевой воды в подогревателе горячего водоснабжения II ступени, позволяющие при ограничении расхода сетевой воды на ввод теплового пункта обеспечить нормальную подачу тепла в системы отопления и горячего водоснабжения.

Ключевые слова: тепловая сеть, теплоноситель, температурный график, система отопления, система горячего водоснабжения, тепловой пункт, тепловая мощность, теплообменник, подогреватель.

**1. Типовые режимы работы тепловых пунктов с различным соотношением нагрузок отопления и горячего водоснабжения.** Часто в двухступенчатых схемах присоединения подогревателей горячего водоснабжения (ГВС) в тепловых пунктах (ТП) наблюдается нерациональное использование тепловой энергии в теплый период года, когда в сеть возвращается вода с завышенной температурой  $t_2$ , нередко превышающей даже температуру обратной воды после системы отопления  $t_{o2}$ .

Применение двухступенчатых схем присоединения подогревателей ГВС в ТП в соответствии с СП 41-101-95, п. 3.14 ограничивается соотношением максимальных нагрузок на отопление  $Q_{omax}$  и горячее водоснабжение  $Q_{hmax}$   $\psi = \frac{Q_{hmax}}{Q_{omax}} = (0,2..1)$ . Принципиальная схема ТП с двухступенчатой смешанной схемой присоединения подогревателей ГВС представлена на рис. 1.

Рассмотрим типовые режимы ТП с двухступенчатой схемой и с различным соотношением  $\psi$  в зависимости от относительной нагрузки отопления  $\bar{Q}_o = \frac{Q_o}{Q_{omax}}$  (рис. 2).  $\bar{Q}_o = 1$  при  $t_{ho}$  — температуре наружного воздуха для расчета отопления и уменьшается при повышении температуры наружного воздуха, а также зависит от ряда других факторов: действительной температуры воды в подающей магистрали теплосетей и системы отопления, потерю тепла при изменении скорости ветра, инфильтрации, бытовых тепловыделений.

Расчеты сделаны по методике, изложенной в [1].

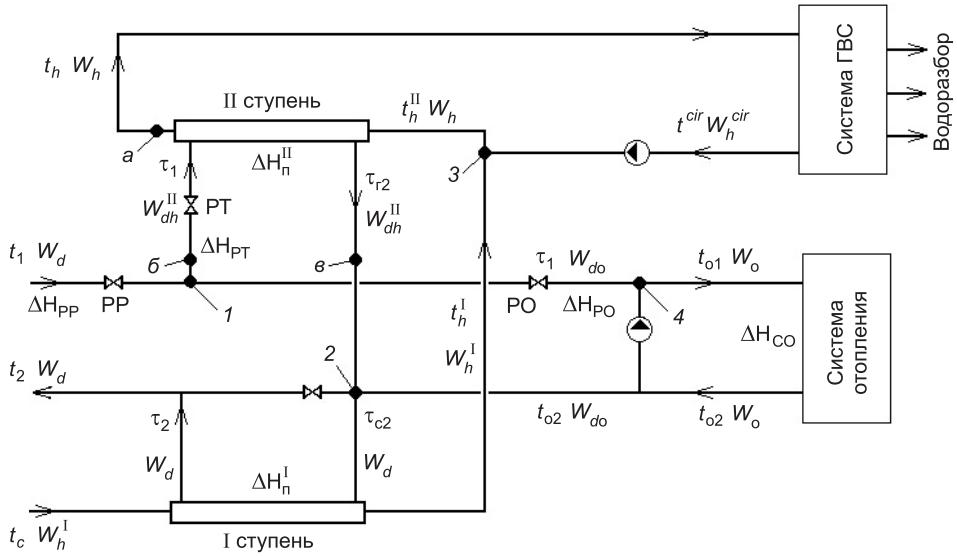


Рис. 1. Расчетная схема ТП с двухступенчатой смешанной схемой подогревателей ГВС с ограничением расхода сетевой воды

1–3 — точки основных балансов; РР — регулятор расхода; РТ — регулятор температуры нагреваемой воды на ГВС; РО — отопительный регулятор;  $\Delta H$  — потери напора

Как видно из рис. 2, а, чем больше соотношение  $\psi$ , т.е. чем больше нагрузка ГВС по отношению к отопительной, тем ниже температура возвращаемой воды  $\tau_2$ . В то же время при небольшом соотношении  $\psi$  после точки излома наблюдается высокая температура  $\tau_2$ , превышающая даже  $\tau_{o2}$ .

Однако чем выше  $\psi$  (рис. 2, б), тем больший расход сетевой воды  $G_{dh}^{II}$  поступает в подогреватель ГВС II ступени при водоразборе выше среднего, а в систему отопления поступает уменьшенное количество сетевой воды  $G_{do}$  (постоянный расход воды в системе отопления поддерживается работой смесительных насосов, подмешивающих воду из обратной магистрали системы отопления). При больших  $\psi$  расход из сети в систему отопления может уменьшиться даже до нуля и система отопления будет работать только на обратной воде.

Для устранений дефицита тепла, поступающего в систему отопления в соответствии с требованиями энергосбережения, необходимо повышение теплоустойчивости зданий, иными словами, увеличивается толщина стен за счет применения эффективных утеплителей. Таким образом, при небольшом водоразборе в системе ГВС или его отсутствии система отопления восстанавливает свою тепловую мощность.

Располагаемая тепловая мощность на вводе используется не полностью (рис. 2, в):  $Q_d^{\text{д}} < Q_d^{\text{tp}}$  вследствие уменьшения подачи теплоты в систему отопления, т.е. появления дефицита  $\Delta Q_{do} = Q_{do}^{\text{tp}} - Q_{do}^{\text{д}}$ . И чем выше  $\psi$ , тем больше дефицит теплоты. То есть тепловые сети способны подать большее количество теплоты, чем может быть использовано в ТП. Часть теплового потенциала просто теряется вследствие неоптимальности регулирования.

На рис. 3 показан расчет суточного режима работы ТП с типовым соотношением  $\psi = 0,35$  при высоких температурах наружного воздуха и переменном водоразборе в сравнении с эксплуатационными данными [2].

Для расчета переменных суточных режимов ТП использовались временные зависимости текущих значений из [2]: наружной температуры по

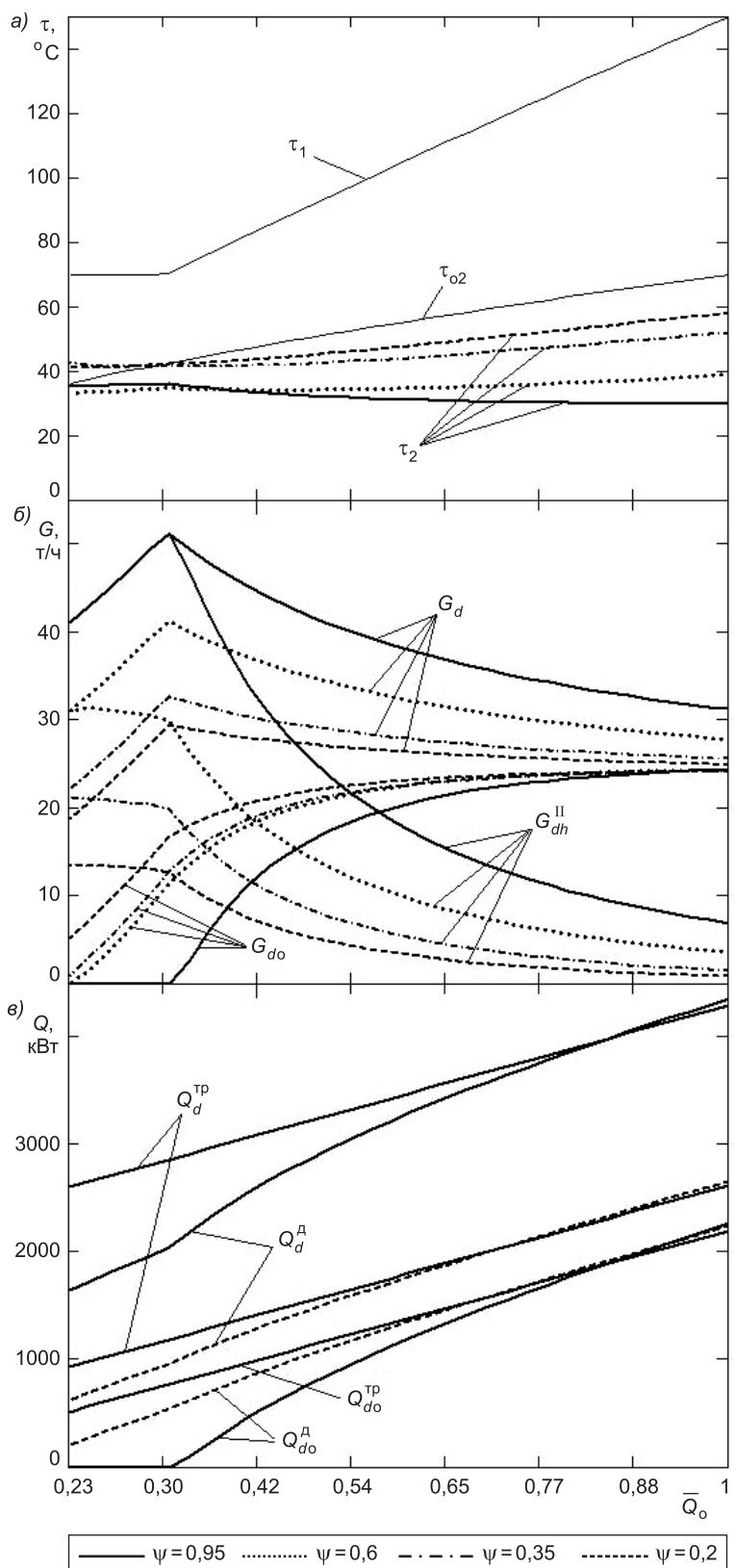


Рис. 2. Режимы работы ТП при традиционном способе регулирования и различном соотношении  $\psi$

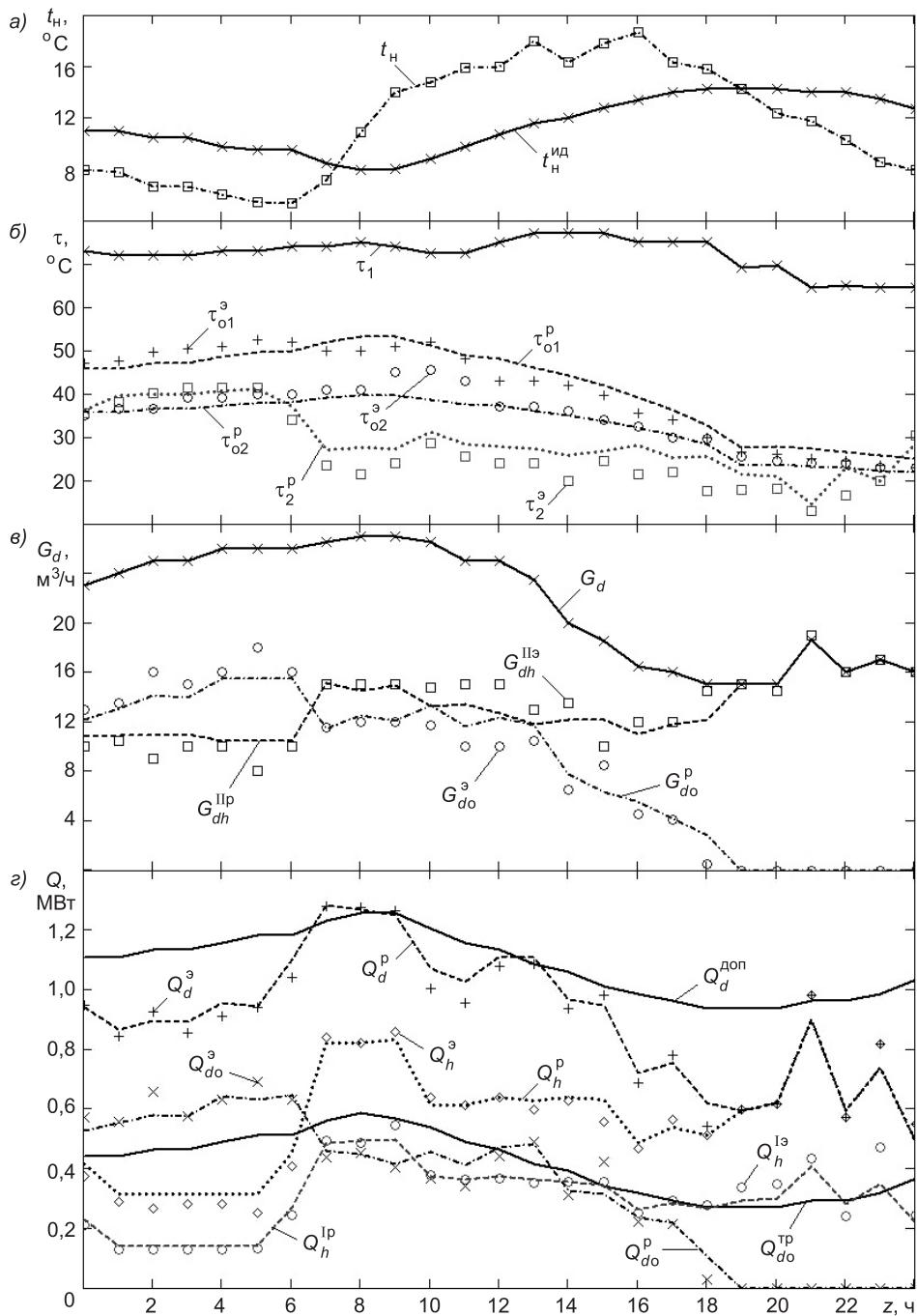


Рис. 3. Суточный режим работы ТП с  $\psi = 0,35$  при средней  $t_h^{\text{ид}} = +11,5$  °С  
Эксплуатационные данные приняты по [2], индекс «р» — расчетные значения;  
«е» — эксплуатационные данные

инерционному датчику  $t_h^{\text{ид}}(z)$ ; температуры воды в подающей магистрали  $\tau_1(z)$ ; расхода воды в тепловой сети  $G_d(z)$ ; величины водоразбора  $G_h^I(z)$ .

а)  $t_h$  — текущая температура наружного воздуха;  $t_h^{\text{ид}}$  — температура наружной среды, измеренная инерционным датчиком;

б)  $\tau$  — температуры сетевой воды;

в)  $G_d$  — расходы сетевой воды;

г)  $Q_h^I$  — тепловая мощность I ступени подогревателя;  $Q_h$  — суммарная системы ГВС;  $Q_{do}$  — действительная и  $Q_{do}^{tp}$  — требуемая тепловая мощность системы отопления;  $Q_d$  — действительная и  $Q_d^{don}$  — допустимая тепловая мощность тепловой сети.

На рис. 3, г видно, что практически при любом водоразборе в системе ГВС, даже при его отсутствии, тепловая мощность, подаваемая тепловой сетью, используется не полностью и часть тепла выбрасывается.

**2. Расчет рациональных режимов.** Рассмотрим ТП с соотношением  $\psi = 0,35$  в течение отопительного сезона.

Требуемый эквивалент расхода сетевой воды на ввод ТП, не превышающий максимального расчетного для обеспечения требуемой тепловой мощности системы отопления, можно определить, используя график тепловых потоков на рис. 2, в:

$$W_d(\bar{Q}_o) = \frac{Q_{do}^d + \Delta Q_{do}}{\tau_1 - \tau_{o2}} + W_{dh} \leq W_{dmax}, \quad (1)$$

где  $W_{dh}$  — эквивалент расхода на ГВС из тепловой сети;

$W_{dmax}$  — расчетный эквивалент расхода сетевой воды, принимающий максимальное значение в точке излома.

Однако при регулировании расхода сетевой воды на ГВС в подогревателе II ступени только по температуре горячей воды  $t_h$  почти весь расход сетевой воды будет использоваться на ГВС (вследствие постоянства  $\tau_1$  при наибольшем  $W_{dh}^H$  в этот период). Тепловая мощность источника теплоты и в этом случае будет использована не полностью в течение большой части отопительного сезона.

По результатам проведенных расчетов можно сделать вывод, что для рационального использования тепловой энергии в данной схеме требуется система регулирования с программным управлением отпуска тепла системам ГВС и отопления. Для задания программы необходимо определить эквивалент расхода сетевой воды, проходящей через подогреватель II ступени  $W_{dh}^{Htp}$ , и температуру воды, возвращаемой в тепловую сеть  $\tau_2^{tp}$ , при которой тепловая мощность системы теплоснабжения будет использована полностью и, следовательно, тепловой режим системы отопления не будет зависеть от работы системы ГВС. При этом, однако, необходимо учитывать условие, что согласно СП 41-101-95, подогреватель II ступени был рассчитан на пропуск всего расхода сетевой воды  $W_{dmax}$  в точке излома и, следовательно, имеет уменьшенную площадь.

Примем во внимание, что в подогревателе II ступени использовался большой расход сетевой воды  $W_{dh}^H$  при небольшом перепаде температур сетевой воды  $\tau_1 - \tau_{r2}$ . Поэтому задачами программы системы автоматического регулирования являются: а) уменьшение расхода сетевой воды через подогреватель II ступени  $W_{dh}^{Htp}$  за счет увеличения перепада температур в подогревателе  $\tau_1 - \tau_{r2}^{tp}$ ; б) использование расхода  $W_d - W_{dh}^{Htp}$  для системы отопления.

Определим температуру воды после подогревателя I ступени  $\tau_2^{tp}$ , которую необходимо возвращать в тепловую сеть из условия, что в системе будет использован весь требуемый расход теплоты  $Q_d^{tp}$ :

$$\tau_2^{tp}(\bar{Q}_o) = \tau_1 - \frac{Q_d^{tp}}{W_d}. \quad (2)$$

Поскольку тепловая мощность I ступени подогревателя  $Q_h^I$  и расход сетевой воды через подогреватель такие же, как и при традиционном способе регулирования, можно найти требуемую температуру смешанной воды на входе в подогреватель I ступени:

$$W_d(\bar{Q}_o) = \frac{Q_h^I}{\tau_{c2}^{tp} - \tau_2^{tp}} \Rightarrow \tau_{c2}^{tp}(\bar{Q}_o) = \tau_2^{tp} + \frac{Q_h^I}{W_d}. \quad (3)$$

Для определения требуемого эквивалента расхода сетевой воды в подогревателе II ступени  $W_{dh}^{IItp}$  и требуемой температуры сетевой воды  $\tau_{r2}^{tp}$  на выходе из подогревателя II ступени составим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} W_{dh}^{IItp}(\bar{Q}_o) &= \frac{Q_h^{II}}{\tau_1 - \tau_{r2}^{tp}} \\ \tau_{c2}^{tp}(\bar{Q}_o) &= \frac{W_d - W_{dh}^{IItp}}{W_d} \cdot \tau_{o2} + \frac{W_{dh}^{IItp}}{W_d} \cdot \tau_{r2}^{tp} \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Из решения системы (4) получим выражение (5) для определения  $\tau_{r2}^{tp}$ :

$$\tau_{r2}^{tp}(\bar{Q}_o) = \frac{(\tau_{c2}^{tp} - \tau_{o2}) \cdot \frac{W_d}{Q_h^{II}} \cdot \tau_1 + \tau_{o2}}{1 + (\tau_{c2}^{tp} - \tau_{o2}) \cdot \frac{W_d}{Q_h^{II}}}, \quad (5)$$

после чего величина  $W_{dh}^{IItp}$  находится подстановкой в первое уравнение системы (4).

Результаты расчета по формулам (1–5) представлены на рис. 4 для всего отопительного периода. Можно заметить, что  $Q_{do}^d = Q_{do}^{tp}$ ,  $Q_d^d = Q_d^{tp}$ . Расход сетевой воды для систем отопления  $G_{do}$  также равен требуемому  $G_{do}^{tp}$ .

В течение всего отопительного периода осуществляется нормальная (несвязанная) подача тепла в системы отопления и ГВС.

**3. Режимы для настройки регулятора температуры воды на ГВС.** Регулирование режимов работы ТП на основе предложенной методики необходимо производить по расходу сетевой воды в подогревателе ГВС II ступени  $G_{dh}^{II}$ , поскольку именно этот расход определяет совместную работу систем ГВС и отопления. Температура воды в подающей магистрали тепловой сети зависит от работы источника теплоты, теплопотерь в тепловых сетях и утечек сетевой воды, поэтому на входе в тепловой пункт она может не соответствовать требуемой температуре  $\tau_1^{tp} = f(t_h)$ , определяемой по закону качественного регулирования нагрузки отопления, т.е. возможно, что действительная температура  $\tau_1^d \neq \tau_1^{tp}$ . Произвольность  $\tau_1^d$  вызывает неопределенность значений температур в различных трубопроводах теплового пункта. Однако  $G_{dh}^{II} \neq f(t_h)$ , т.е.  $G_{dh}^{II} \neq f(\tau_1, \tau_{r2})$ . Значение  $G_{dh}^{II}$  зависит от температурных напоров сетевой  $\Delta\tau^{II}$  и нагреваемой  $\Delta t^{II}$  воды в подогревателе. Типовой регулятор температуры (РТ) воды на ГВС изменяет расход сетевой воды через подогреватель  $G_{dh}^{II}$  по сигналу  $t_h$  — температуры нагреваемой воды на выходе из подогревателя (см. рис. 1, точка *a*) и рассчитывается на пропуск суммарного расхода на отопление и ГВС  $G_d$  при максимальном водоразборе в диапазоне наружных температур от точки излома и выше. Однако, по-

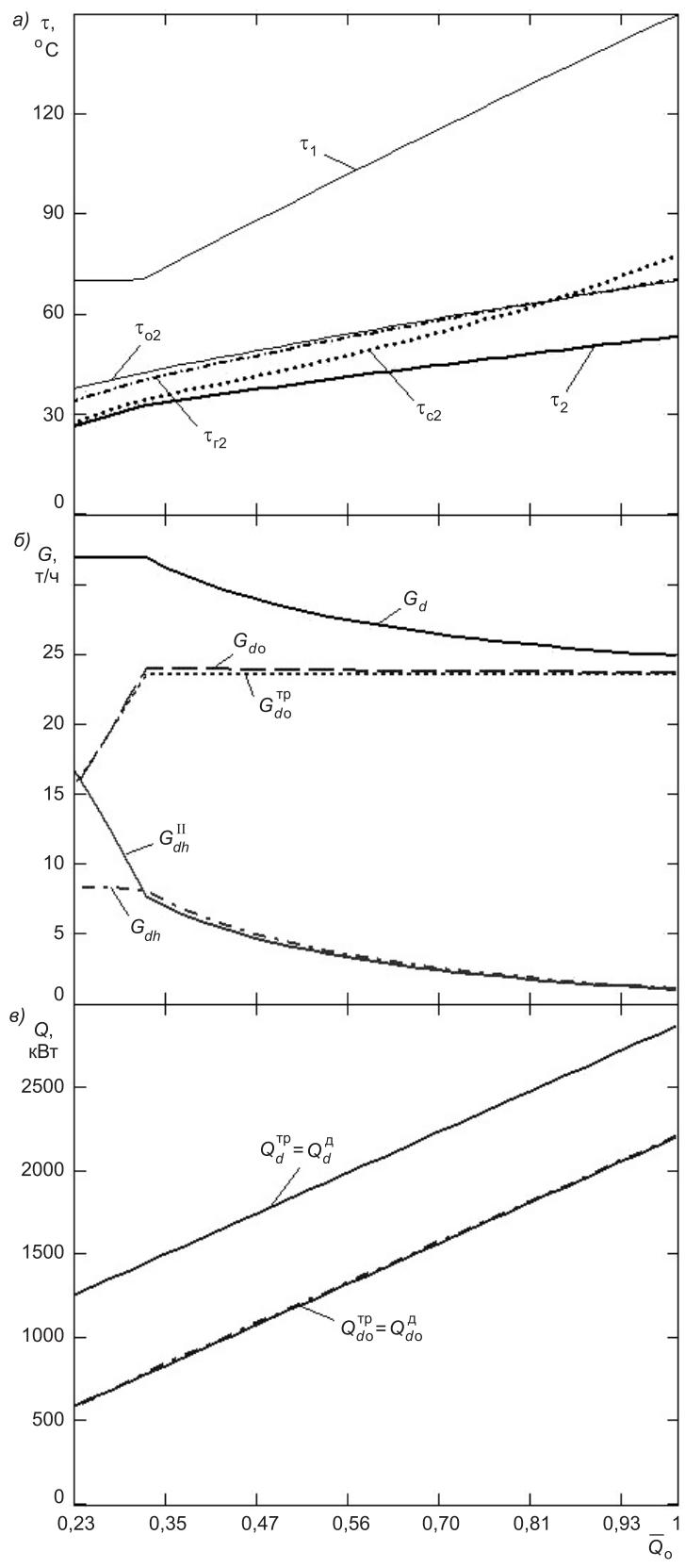


Рис. 4. Режимы работы ТП при программном регулировании тепловых потоков и расходов сетевой воды для систем отопления и ГВС

скольку  $\Delta\tau^{\text{II}} = \tau_1 - \tau_{r2} \neq f(t_h)$ , регулирование должно производиться по температурному перепаду  $\Delta\tau^{\text{II}}$ . Кроме того, по сигналам температур  $\tau_1^{\text{d}}$  (рис. 1, точка *б*),  $\tau_{r2}$  (рис. 1, точка *в*) и  $t_h$  (рис. 1, точка *а*) должен ограничиваться расход сетевой воды с температурой  $\tau_1^{\text{d}}$  через регулятор РТ до расхода  $G_{dh}^{\text{Нтр}}$ , определенного по разработанной методике.

Гидравлическое сопротивление РТ необходимо автоматически изменять при всех нагрузках ГВС и температурах  $\tau_1$ . В данной схеме ТП (см. рис. 1) в точке 1 сетевая вода делится на два потока: через подогреватель II ступени ГВС и через систему отопления. В точке 2 оба потока встречаются и направляются в подогреватель ГВС I ступени, а затем — в тепловую сеть. Запишем в общем виде уравнение потерь напора  $\Delta H$  для обоих потоков, пренебрегая потерями в трубопроводах ЦТП ( $m_{H_2O}$ ):

$$\Delta H_{pp} + \Delta H_{PT} + \Delta H_{n}^{\text{II}} + \Delta H_{n}^{\text{I}} = \Delta H_{pp} + \Delta H_{PO} + \Delta H_{CO} + \Delta H_{n}^{\text{I}}. \quad (6)$$

После сокращения подобных членов и принятия общего сопротивления отопительного регулятора и системы отопления  $\Delta H_{PO} + \Delta H_{CO} = \Delta H_o$  получим

$$\Delta H_{PT} + \Delta H_n^{\text{II}} = \Delta H_o. \quad (7)$$

Поскольку  $\Delta H = SG^2$  ( $S$  — характеристика сопротивления,  $m_{H_2O} \cdot \text{ч}^2 / \text{м}^6$ ), можно записать:

$$S_{PT} G_{dh}^{II^2} + S_n^{\text{II}} G_{dh}^{II^2} = S_o G_{do}^2, \quad (8)$$

где  $G_{do} = G_d - G_{dh}^{\text{II}}$ .

Зная зависимости  $G_{dh}^{\text{II}}$  и  $G_d$ , определим требуемое минимальное гидравлическое сопротивление программируемого регулятора температуры РТ:

$$S_{PT}^{\min} = S_o \left[ \frac{G_d}{G_{dh}^{\text{II}}} - 1 \right]^2 - S_n^{\text{II}}. \quad (9)$$

Тогда находим необходимый перепад давлений на клапане программируемого РТ (МПа):

$$\Delta P = g \cdot \rho \cdot S_{PT}^{\min} \cdot G_{dh}^{II^2} \cdot 10^{-6}. \quad (10)$$

**Выводы.** 1. В настоящее время расчеты переменных режимов ТП при высоких температурах наружного воздуха не ведутся в связи с отсутствием расчетных методик для переменных условий работы ТП. Температуры и расходы теплоносителей принимаются равными значениям расчетного режима в точке излома температурного графика. Однако в действительности они не остаются постоянными, а значительно изменяются, что вызывает завышенную температуру в обратной магистрали тепловой сети и нарушения работы системы отопления.

2. Предложенная методика позволяет находить температуры и расходы сетевой и нагреваемой воды не только в «расчетных» условиях, но и при любом переменном режиме работы ТП, в том числе в условиях, не соответствующих проектным, и при аварийных ситуациях.

Рассмотрено применение предложенной методики для условий высоких температур наружного воздуха, проанализированы причины нерационального использования теплового потенциала источника теплоты в этот период.

3. Рекомендована новая схема регулирования ГВС, обеспечивающая рациональные режимы ТП закрытых систем теплоснабжения.

4. Предложенную методику расчета можно применять как для проектирования, так и в условиях действующих тепловых пунктов, поскольку не требуется изменения площади подогревателей ГВС.

5. Рациональное регулирование теплового режима установок с двухступенчатой смешанной схемой подогревателей ГВС с ограничением расхода может сделать эту схему более эффективной, поскольку в этом случае может осуществляться нормальная (несвязанная) подача теплоты в системы отопления и ГВС.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рафальская, Т.А. Совершенствование методов расчета тепловых и гидравлических режимов и компьютеризация систем централизованного теплоснабжения [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Рафальская Татьяна Анатольевна. — Новосибирск, 2003.
2. Зингер, Н.М. Эксплуатационные испытания автоматизированного центрального теплового пункта [Текст] / Н.М. Зингер, А.Л. Бурд, В.И. Кривицкий // Водоснабжение и санитарная техника. — 1980. — № 12. — С. 20–24.

*РАФАЛЬСКАЯ Татьяна Анатольевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: rafalskaya@cn.ru*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)*

Получено после доработки 30.10.11

**Rafalskaya T.A.**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: rafalskaya@cn.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

#### FEATURES OF TEAMWORK OF HEATING AND HOT WATER SUPPLY SYSTEMS AT HIGH TEMPERATURES OF EXTERNAL AIR

Regulation of loading of hot water supply only on temperature of hot water causes infringements of work of heating and the overestimated temperature of return water in a heat supply network at high temperatures of external air. There are obtained the dependences for the task of the program of regulation of the charge of network water in a second step of hot water supply heater which allow at restriction of the charge of water on input of heating point to provide normal submission of heat in systems of heating and hot water supply.

**Key words:** heat network, heat-carrier, the temperature schedule, heating, hot water supply, heating point, heating capacity, heat exchanger, heater, boiler.

#### REFERENCES

1. Rafalskaya, T.A. Perfection of Methods of Calculation of Heating and Hydraulic Modes and Computerization of Centralized System of Heat Supply [Text] : Dis. ... cand. techn. sci. / Rafalskaya T.A. — Novosibirsk, 2003.
2. Zinger, N.M. Operational of test of automated central heating point [Text] / N.M. Zinger, A.L. Burd, V.I. Krivitsky // Water supply and sanitary technical equipment. — 1980. — N 12. — P. 20–24.

## СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ

УДК 625.7/.8

В.В. ЩЕРБАКОВ, М.Н. БАРСУК

### ТЕХНОЛОГИЯ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РОВНОСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Рассмотрены недостатки существующих методов и средств определения ровности дорожного покрытия. Представлен универсальный дорожный курвиметр (УДК «Ровность»), разработанный Сибирским государственным университетом путей сообщения на базе координатного способа определения геометрических параметров автомобильных дорог.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, диагностика, геометрические параметры, ровность, дорожная лаборатория, толчкомер, рейка дорожная универсальная, международный индекс ровности IRI, метод амплитуд, универсальный дорожный курвиметр.

Современные средства измерений и вычислительная техника позволяют разработчикам создавать самые разнообразные диагностические, контрольно-измерительные и специализированные приборы для определения геометрических параметров при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог.

Широкий спектр задач, решаемых при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог, разнообразие технических требований, включая точность, детализацию, объемы измерений и многие другие факторы, обусловливают создание различных типов измерительных систем от портативных до комплексов, устанавливаемых на автомобили.

Одним из основных критериев, определяющих разнообразие измерительной техники, является эффективность. Например, для контроля геометрических параметров при выполнении небольших, локальных участков автомобильных дорог применяется рейка дорожная универсальная «Кондор», а при выполнении диагностики для назначения ремонта — дорожные лаборатории. Такой выбор обусловлен технической и экономической эффективностью применения различных приборов. При проведении проектно-изыскательских работ наибольшая эффективность, особенно на крупных объектах, достигается при использовании дорожных лабораторий, оснащенных лазерными сканерами. При этом экономическая эффективность лабораторий при проектировании и строительстве небольших объектов будет низкой из-за высокой стоимости лабораторий относительно малого числа измерений параметров дорог.

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС) более 10 лет разрабатывает диагностические приборы на базе автомобилей различных моделей и ходовых тележек.

Опыт диагностики автомобильных дорог в Новосибирской области, Алтайском крае и Республике Алтай, а также приемки в эксплуатацию новых автомобильных дорог (например, Северный обход г. Новосибирска) и оценка качества после выполнения капитального ремонта выявил недостатки современных методов и средств диагностики. Особого внимания заслуживает определение ровности покрытия автомобильных дорог при приемке в эксплуатацию пусковых комплексов после капитального ремонта и новых дорог.

В соответствии с ГОСТ 30412–96 [1] ровность может быть определена рейкой с клиновым промерником, установкой ПКРС-2 или по высотным отметкам с использованием нивелира и нивелирных реек. Приведенные в ГОСТ 30412–96 методы применяются для определения ровности как при операционном контроле, так и при приемке пусковых комплексов в эксплуатацию.

При выполнении диагностики для определения эксплуатационного состояния автомобильных дорог, допустимого по условиям обеспечения безопасности дорожного движения [2], ровность может быть определена с использованием ПКРС-2 и по просветам под трехметровой рейкой. В соответствии с требованиями ОДН 218.0.006–2002 [3] предусмотрено определение ровности с использованием толчкомера ТХК-2. Кроме этого в соответствии с рекомендациями Росавтодора оценку ровности необходимо выполнять по международному индексу ровности IRI. В этом направлении ведутся научно-исследовательские работы по установлению корреляционных зависимостей между показателями IRI и толчкомерами различных типов, разрабатываются требования к выполнению измерений.

Каждый из приведенных методов имеет функциональные недостатки. Рассмотрим недостатки оценки ровности по международному показателю ровности IRI.

В расчет показателя IRI входят подрессорная и неподрессорная масса автомобиля, жесткость рессорной подвески, коэффициент суммарного сопротивления амортизатора и трения в сочленениях подвески, радиальная жесткость шины колеса.

Анализируя факторы, влияющие на точность измерений, можно сделать вывод о том, что все перечисленные параметры изменяются в силу различных причин, включая температуру, угол наклона автомобиля (перераспределение давления) на передние и задние колеса, объем заправки топливом, силу ветра, осадки, временные факторы, влияющие на жесткость пружин и т.д. Учесть каким-либо образом данные изменения практически нельзя, при этом точность измерений в значительной степени зависит от динамики изменения приведенных факторов.

В целом достоверность получаемых данных по ровности может соответствовать только качественным показателям, другие показатели надежности количественных характеристик в связи с влиянием приведенных факторов до настоящего времени не определены. Кроме того, неровности покрытия с увеличением длины волны при интегрировании сглаживаются. Важным фактором в реальных условиях является движение с постоянной скоростью во время измерений. Очевидные достоинства данных методов — высокая производительность и простота реализации. Косвенные (интегральные) методы обеспечивают высокую техническую и экономическую эффективность при диагностике с целью оценки состояния автомобильных дорог, когда важны относительные характеристики.

К прямым методам относится определение ровности с помощью трехметровой рейки дорожной универсальной, а также с помощью нивелира и нивелирных реек. Определение ровности с использованием рейки дорожной универсальной — наиболее простой метод. К недостаткам этого метода следует отнести низкую производительность и ограниченность базы измерений (3 м). Второй недостаток особенно важен, так как влияет на точность и достоверность оценки ровности при наличии длины волны (неровности), превышающей базу измерений. Поэтому оценка ровности по рейке дорожной универсальной всегда является завышенной по отношению к другим прямым методам. На рис. 1 показана неровность, фактическая величина которой  $f$  (стрела изгиба), а при измерении неровности с использованием рейки с промерником значение неровности составит  $f_p$ . Стрела изгиба (неровность), измеренная рейкой дорожной универсальной,  $f_{p1}$  и  $f_{p2}$  (рис. 1).

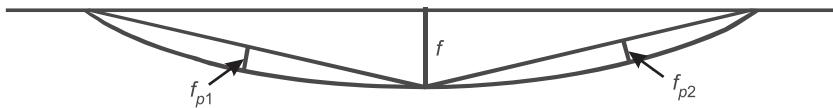


Рис. 1. Сущность определения неровности рейкой дорожной универсальной

Значение неровности (стрелы изгиба)  $f$  можно определить из выражения

$$f = \frac{L^2}{8R}, \quad (1)$$

где  $R$  — радиус неровности длиной  $L$ .

Для того же значения  $R$  величины неровности стрел изгиба составят

$$f_p = \frac{L_{\text{РД}}^2}{8R}. \quad (2)$$

Предположим, что  $R = 90$  м,  $L = 6$  м, тогда из выражения (1) найдем, что  $f = 50$  мм, а значение  $f_p = 12$  мм.

Разность стрел изгиба  $\Delta f$ , фактической и полученной при измерении неровности длиной  $L$  рейкой дорожной универсальной определяется из выражения

$$\Delta f = \frac{1}{8R} (L^2 - L_{\text{РД}}^2). \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что чем длиннее неровность, тем больше разность стрел изгиба и, соответственно, ниже точность определения фактической неровности. Поэтому достоверно величину неровности рейкой дорожной универсальной можно определять, исходя из выражения (3) при длинах неровностей, не превышающих длину самой рейки. Учитывая широкий спектр частот и распределения в этом спектре длин неровностей, применение рейки дорожной универсальной для оценки состояния покрытия по параметру «ровность» не обеспечивает требуемую достоверность и, следовательно, качество оценки состояния покрытия.

Наиболее точный метод определения ровности базируется на определении высотных отметок (метод амплитуд). Он широко применяется в геодезии в различных областях инженерной деятельности от геодезического обеспечения строительства ядерных реакторов до обеспечения

идеально ровной плоскости (линии) при установке технологического оборудования.

Для определения неровностей используются различные виды нивелирования (гидростатическое, гидродинамическое, геометрическое), в том числе с применением лазерных построителей плоскости.

Сущность метода заключается в определении высотных отметок путем геометрического нивелирования покрытия автомобильной дороги (рис. 2) с «шагом» 5 м и вычислении по формуле (4) амплитуд неровностей:

$$\delta = \frac{H_{i-1} + H_{i+1}}{2} - H_i. \quad (4)$$

Метод амплитуд в соответствии с требованиями ГОСТ 30412–96 имеет существенные недостатки, некоторые из них являются принципиальными.

Так, «шаг» съемки 5 м не обеспечивает надежное и однозначное определение неровностей, длина которых менее 5 м.

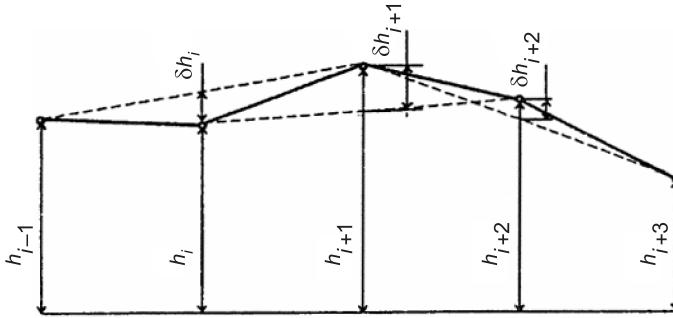


Рис. 2. Метод амплитуд по ГОСТ 30412–96

Из рис. 3 видно, что неровность с амплитудой  $f$  на длине  $l$  (менее 5 м) при измерении не зафиксирована и при обработке данных и оценке состояния не будет учтена, что ограничивает достоверность определения ровности в соответствии с ГОСТ 30412–96 (метод амплитуд).

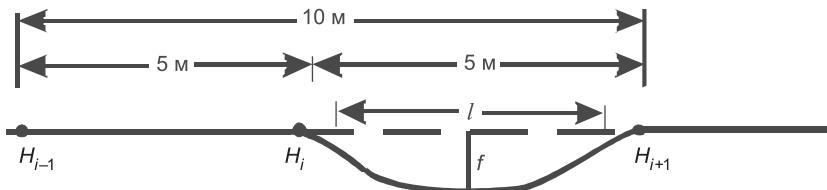


Рис. 3. Принципиальные недостатки метода амплитуд в соответствии с ГОСТ 30412–96

Формально часть спектра частот длин неровностей вообще не попадает в оценку состояния покрытия по параметру ровность. Трудоемкость работ при этом не сопоставима с другими методами. Для оценки ровности требуется квалифицированный геодезист и выполнение большого объема измерений и вычислений, как правило, с выявлением собственных ошибок и дополнительными полевыми и камеральными работами.

Оценка состояния покрытия автомобильных дорог в настоящее время также не соответствует фактическому состоянию. Например, неровно-

сти, определенные по рейке и методом амплитуд, оцениваются в соответствии со СНиП 3.06.03–85 без учета разности базы измерений 3 и 5 м.

Из формулы (3) видно, что стрелы изгиба (амплитуды неровностей), измеренные на базе 3 и 5 м, не могут однозначно оцениваться. При оценке ровности аэродромных покрытий [4] возможны отклонения до 2 % от допустимого при использовании трехметровой рейки, а при использовании метода амплитуд — до 5 %.

Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС) на базе опыта, полученного при различных видах диагностики автомобильных и железных дорог, разработал координатный способ определения геометрических параметров и реализовал его при создании приборов для определения ровности на автомобильных (УДК «Ровность») и железных дорогах (АПК «Профиль»).

Универсальный дорожный курвиметр УДК «Ровность» представляет собой ходовую тележку с установленной на ней инерциальной системой, содержащей гироскоп и акселерометры. УДК «Ровность» позволяет определять пространственные координаты ( $X$ ,  $Y$ ,  $H$ ) текущего положения тележки, а также определять с высокой точностью ( $\pm 1$  мм) геометрические параметры, в том числе ровность. В основе измерений лежит схема гирополукомпаса и соответствующая аппаратная реализация.

Главным и основным отличием УДК «Ровность» от существующих измерительных средств является автоматизация измерения высотных отметок для определения продольной ровности покрытия автомобильных дорог. Для исключения недостатков интегральных (косвенных) и прямых методов разработан алгоритм определения ровности на скользящей хорде заданной длины или нескольких хорд, например, от 1 до 100 м с «шагом» съемки 5 см и единичным смещением хорды через заданный интервал, соответствующим «шагу» съемки 5 см. При этом анализ можно выполнить при смещении хорды на 5 см, 50 см, 1 м и т.д., в том числе в соответствии с требованиями ГОСТ 30412–96 через 5 м. Ровность определяется в соответствии с формулой (4).

Высокая детализация съемки («шаг» съемки 5 см) позволила определять неровности в широком диапазоне, длины волн которых составляют от 5 см до 100 м, прямыми методами с вычислением величины неровности (мм) на каждые 5 см пути для хорд, например, 5 м, 10, 20, 40 м.

На рис. 4 показан фрагмент участка дороги, для которого определена ровность с использованием УДК «Ровность».

На рис. 4  $H_6$ ,  $H_{10} \dots H_{203}$ ,  $H_{205} \dots H_{406}$ ,  $H_{410}$  — высотные отметки точек 6, 10...203, 205...406, 410.

Координатный способ определения геометрических параметров, в том числе и ровности, реализованный в УДК «Ровность», позволяет определять характеристики кривых (начало и конец переходных кривых, начало и конец круговой кривой, средний радиус круговой кривой, максимальный и минимальный радиусы круговой кривой), поперечные уклоны и продольный профиль, ровность покрытия автомобильных дорог и пройденное расстояние.

На рис. 5 приведен внешний вид УДК «Ровность». Из конструктивных особенностей необходимо выделить высокое качество изготовления колес. Эксцентрикситет не превышает 0,1 мм, жесткость и эластичность резиновой накладки обеспечивают стабильность радиуса качения. УДК «Ровность» изготавливается в базовом варианте с комплексированным ГНСС (Trimble R7, R8).

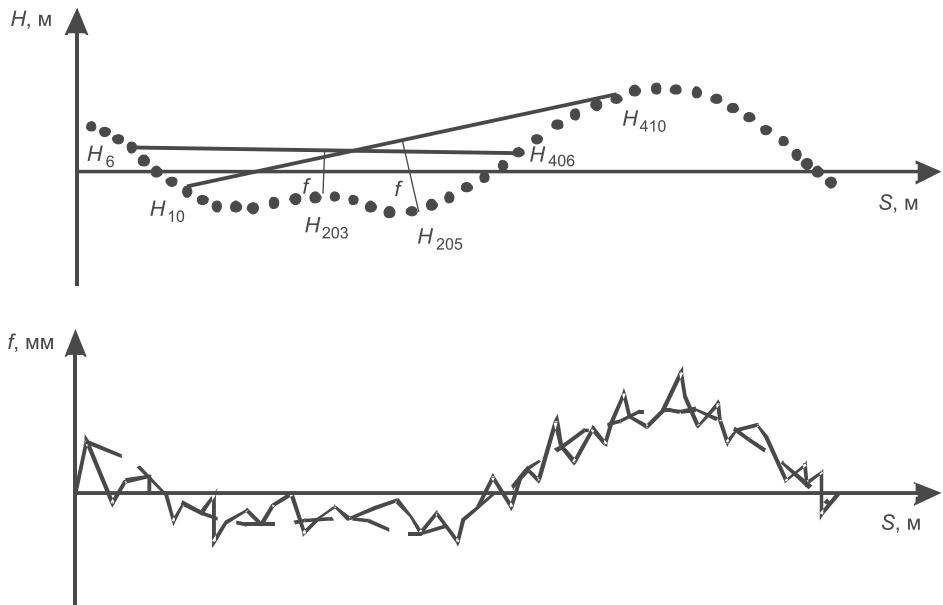


Рис. 4. Фрагмент участка дороги (а) и график ровности (б)

Измерения с помощью УДК «Ровность» осуществляются путем его ручного перемещения по полосе движения на расстоянии 1 м от кромки. В состав измерительной бригады включают, как правило, двух человек. На время выполнения измерений движение на участке автомобильной дороги закрывается.

Предварительно перед выполнением измерений оператор выполняет калибровку, а в процессе передвижения тележки контролирует измеряемые параметры визуально, глядя на дисплей портативного компьютера.



Рис. 5. УДК «Ровность»

### Технические характеристики УДК «Ровность»

Диапазон измерений		Погрешность измерений	
Ровность, мм	50	Ровность, мм	1
Поперечные уклоны, ‰	300	Поперечные уклоны, ‰	2
Расстояние, км	10	Расстояние, км	0,1
База измерения, м	5–20		

Таким образом, анализ средств и методов измерений показывает, что координатный способ, реализованный в УДК «Ровность», по функциональным возможностям в полной степени соответствует точности измерений, производительности работ, технической и экономической эффективности средств измерений, предназначенных для операционного контроля, исполнительных съемок, приемки пусковых комплексов в эксплуатацию (см. таблицу).

Учитывая возможность оценки по параметру «ровность» в широком диапазоне длин волн неровностей от 5 см до 100 м при определении превышений через 5 см и амплитуды неровностей с погрешностью 1 мм, можно разработать нормативные требования и регламенты, в основу которых включить УДК «Ровность». Кроме того, необходимо рассмотреть возможность применения УДК «Ровность» в качестве эталонного средства для калибровки интегральных средств и методов измерений и оценки ровности по индексу ровности IRI.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 30412–96. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы определения ровности поверхности дорожных покрытий [Текст]. — М. : Изд-во стандартов, 1996. — 27 с.
2. ГОСТ Р 50597–93. Требования к эксплуатационному состоянию, допустимому по условиям обеспечения безопасности дорожного движения [Текст]. — М. : Изд-во стандартов, 1994. — 16 с.
3. ОДН 218.0.006–2002. Правила диагностики и оценки состояния автомобильных дорог [Текст] / Минтранс РФ. — М. : Транспорт, 2002. — 131 с.
4. СНиП 3.06.03–85. Автомобильные дороги [Текст] / Госстрой СССР. — М. : ЦИПП Госстроя СССР, 1985. — 106 с.

**ЩЕРБАКОВ Владимир Васильевич, канд. техн. наук, проф.; E-mail: vvs@stu.ru**  
**Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск**  
**БАРСУК Марина Николаевна, ст. препод.; E-mail: marishanb@mail.ru**  
**Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск**

Получено после доработки 07.10.11

**Shcherbakov V.V.**, candidate of technical sciences, professor; E-mail: vvs@stu.ru, Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia

**Barsuk M.N.**, senior lecturer; E-mail: marishanb@mail.ru, Siberian State Transport University, Novosibirsk, Russia

### THE TECHNOLOGY AND DEVICES FOR DETERMINING THE SMOOTHNESS OF HIGHWAYS

Existing methods shortcomings and facilities for determining the flatness of the road surface were examined. Universal Road Curvometer (URC «Rovnost») is presented. It was developed in Siberian State Transport University based on the coordinate method for determining the geometrical parameters of highways.

**Key words:** highways, diagnostics, geometrical parameters, smoothness, road laboratory, roughmeter, batten of the road universal, international roughness index (IRI), method of amplitudes, Universal Road Curvometer.

## REFERENCES

1. GOST (State Standard) 30412–96. Highways and Aerodromes. Methods of Definition of Smoothness of a Surface of Road Coverings [Text]. — M. : Standards Publishing House, 1996. — 27 p.
  2. GOST R (State Standard of Russia) 50597–93. Requirements to an Operational Condition, Admissible on Conditions of Safety of Traffic [Text]. — M. : Standards Publishing House, 1994. — 16 p.
  3. ODN (Branch Road Standards) 218.0.006–2002. Rules of Diagnostics and Estimation of a Condition of Highways [Text] / The Ministry of transport of the Russian Federation. — M. : Transport, 2002. — 131 p.
  4. CN&R (Construction Normes and Regulation) 3.06.03–85. Highways [Text] / The USSR State Committee for Construction. — M. : CIPT of the USSR State Committee for Construction, 1985. — 106 p.
-

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.878/.879.004.67

В.Б. ЛОМУХИН, А.Б. ВИНОГРАДОВ, И.В. ЛАПТЕВА, В.В. СУРГИН

### ГИПОТЕЗА О МЕХАНИЗМЕ ДЕЙСТВИЯ РЕМОНТНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫХ СОСТАВОВ НА СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ И СОСТАВЛЯЮЩИХ ИХ УЗЛЫ

Применение ремонтно-восстановительных составов (РВС) имеет как положительные, так и отрицательные эффекты. Это, на наш взгляд, связано с несколькими научно-техническими проблемами, в том числе и отсутствием единого мнения по механизму действия ремонтно-восстановительных составов.

**Ключевые слова:** ремонтно-восстановительный состав, трение, строительные машины, механизмы.

Если последовательно рассмотреть внутренний адсорбционный эффект Ребиндера и гидродинамическую теорию смазки [1], то можно констатировать:

1. Внутренний адсорбционный эффект вызывается адсорбией поверхностно-активных веществ на внутренних поверхностях раздела — зародышевых микротрещинах разрушения, возникающих в процессе деформации твердого тела (рис. 1). Этот эффект заключается в адсорбции атомов поверхностно-активных веществ на поверхностях микротрещин при деформации и разрушении твердого тела. Трещины быстрее развиваются в результате уменьшения работы, затрачиваемой на образование новой поверхности.

Отличительная особенность эффекта Ребиндера — проявление его только при совместном действии среды и определенного напряжения. Эффект может быть вызван как адсорбией, так и воздействием жидкости. Наиболее сильно эффект Ребиндера наблюдается в условиях образования новых поверхностей.

2. Если рассмотреть пару трения вал — вкладыш, типичную для режима смазки большинства пар трения строительных машин и механизмов (рис. 2), то в неработающем механизме вал своей массой выдавливает масло из зазоров между шейками и вкладышами и ложится на нижнюю поверхность вкладыша. Их разделяет тончайшая пленка масла, прочность и толщина которой зависят от полярности молекул, входящих в масло.

Зазор между шейкой и подшипником, имеющий клиновидную форму, в какой-то степени заполнен маслом.

При запуске механизма вал начинает вращаться. При первых же оборотах шейка вала за счет явления прилипания масла к металлу будет увлекать за собой граничные слои масла. Благодаря вязкости вместе с граничными слоями будет перемещаться остальная часть масла, заполняю-

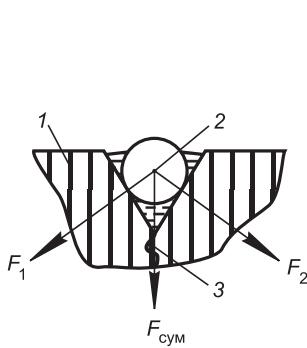


Рис. 1. Классическая схема эффекта Ребиндера  
1 — тело детали; 2 — полярная молекула, частица продукта износа; 3 — микротрещина

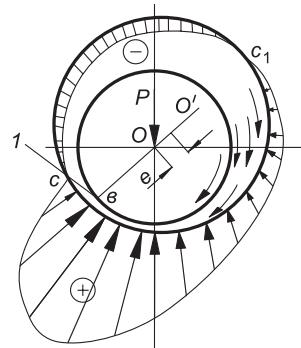


Рис. 2. Механизм образования масляного клина при вращении вала в подшипнике

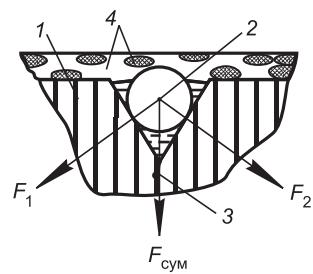


Рис. 3. Процесс восстановления (защиты) поверхности трения  
1 — тело детали; 2 — полярная молекула, частица продукта износа; 3 — микротрещина; 4 — слой, образованный РВС

щая зазор. В узкую серповидную часть (по ходу вращения) нагнетается все большее количество масла, повышается давление, вал начинает приподниматься, как бы всплывать в подшипнике. Между валом и нижней частью подшипника образуется масляный клин. При большой частоте вращения вала в подшипнике возрастает давление в масляном клине, вал, несколько смещаясь в сторону вращения, еще больше поднимается на масляной подушке. В масляном слое развивается высокое, так называемое гидродинамическое давление. Между валом и подшипником возникает жидкостное трение.

Создатель гидродинамической теории смазки — выдающийся русский ученый Н.П. Петров, предложивший формулу (упрощенный вариант) для расчета силы трения концентрически расположенного вала в подшипнике [2].

Таким образом, жидкостное (гидродинамическое) трение зависит от процессов внутреннего трения в смазочном масле, т.е. его вязкости.

Согласно упрощенному варианту формулы, чем больше вязкость, тем больше сила  $F_{\text{сум}}$ , которая в классической схеме эффекта Ребиндера вызывает увеличение расклинивающих сил  $F_1$ ,  $F_2$ .

Следовательно, при разработке технологии применения ремонтно-восстановительных составов должны учитываться и параметры вязкости смазки в восстанавливаемом узле.

Визуально процесс восстановления (защиты) представлен на рис. 3. Однако остается проблема силы трения. Для минимизации последствий воздействия этой силы необходимо увеличить площадь, которая «закрывает» условную трещину.

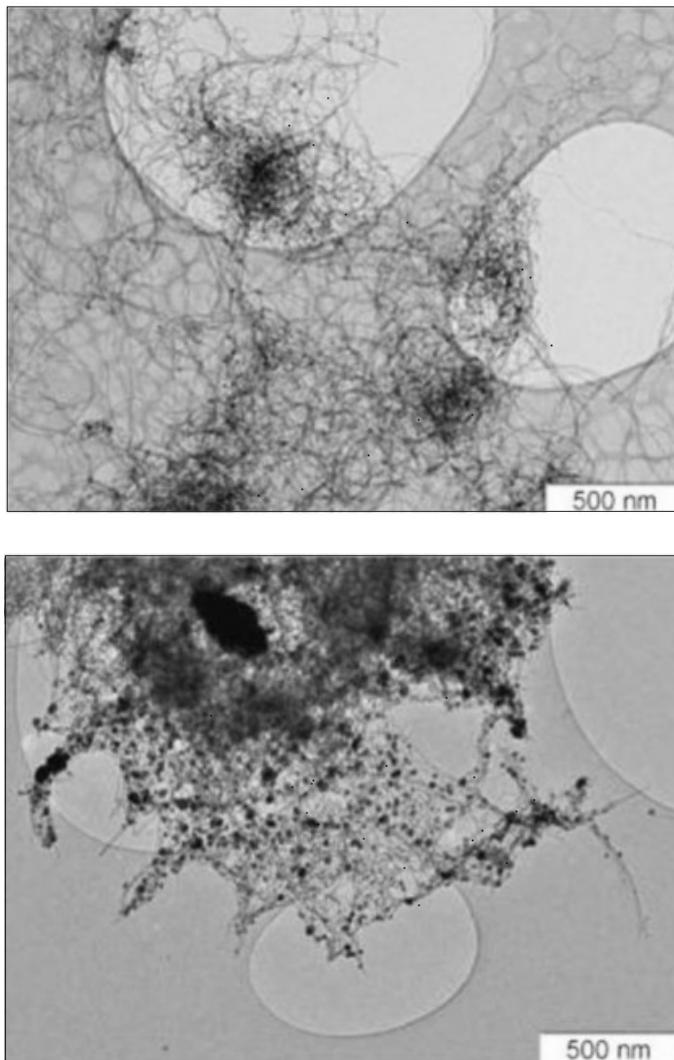
Такой эффект достигается при «связывании» компонентов ремонтно-восстановительного состава (см. рис. 3, 4).

Связать компоненты ремонтно-восстановительного состава можно с помощью многослойных углеродных нанотрубок, насытив их частицами металла различного размера (рис. 4).

Таким образом, применение ремонтно-восстановительного состава возможно на любой стадии жизненного цикла механизма.

Для подтверждения изложенной гипотезы был проведен простейший эксперимент.

Испытание проводилось с помощью обычной хозяйственной кофемолки и дрели. В емкость кофемолки, в которую погружается нож для



*Рис. 4.* Насыщение многослойных углеродных нанотрубок  
Введение частиц металла в агрегаты МУНТ (варьирование размера  
и концентрации металла)

перемалывания, был насыпан обычный песок. Нож погрузили в песок и врашали с помощью дрели в течение 30 мин с перерывами через 10 мин. На каждом перерыве производилось взвешивание ножа. После каждого взвешивания вес ножа снижался на 0,2–0,4 г. Затем нож погрузили в стеклянную емкость, заполненную РВС, и врашали его в течение 20 мин. При взвешивании вес ножа увеличился на 0,5 г.

Предложенная гипотеза о механизме действия ремонтно-восстановительного состава работоспособна, так как действует и на микро-, и на макроуровнях, в отличие от высказанных ранее, которые действуют фрагментарно.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаркунов, Д.Н. Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности при трении. Водородное изнашивание металлов [Текст] / Д.Н. Гаркунов. — М. : Изд-во МСХА, 2004. — 383 с.

2. Пахомов, Э.А. Диагностика при эксплуатации тепловозов [Текст] / Э.А. Пахомов. — М. : Транспорт, 1974. — 40 с.

**ЛОМУХИН В.Б.**, канд. техн. наук, доц.; E-mail: dll91@mail.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**ВИНОГРАДОВ А.Б.**, д-р техн. наук, проф.; E-mail: same@sibstrin.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**ЛАПТЕВА И.В.**, асп.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

**СУРГИН В.В.**, асп.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 27.09.11

**Lomuhin V.B.**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: dll91@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Vinogradov A.B.**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: same@sibstrin.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Lapteva I.V.**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

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

### **HYPOTHESIS ABOUT THE MECHANISM OF ACTION OF REPAIR-REGENERATIVE STRUCTURES ON BUILDING CARS AND MAKING THEIR KNOTS**

Application of repair-regenerative structures has both positive, and negative effects. It is in our opinion connected with several scientific and technical problems, including absence of a common opinion on the mechanism of action of repair-regenerative structures.

**Key words:** repair-regenerative structure, a friction, building cars, mechanisms.

### REFERENCES

1. Garkunov, D.N. Scientific Discoveries in Tribotekhnika. Effect without Deterioration at a Friction. Hydrogen Wear Process of Metals [Text] / D.N. Garkunov. — M. : Publishing house MSHA, 2004. — 383 p.
  2. Pahomov, E.A. Diagnostics at Operation of Diesel Locomotives [Text] / E.A. Pahomov. — M. : Transport, 1974. — 40 p.
-

УДК 624.155.15 : 621.974

А.С. МЕЛЬНИКОВА, А.С. ДЕДОВ, А.В. ГРУЗИН, Д.Э. АБРАМЕНКОВ

## РАЗВИТИЕ КОНСТРУКЦИЙ МОЛОТОВ ДЛЯ ПОГРУЖЕНИЯ СВАЙ В ГРУНТОВЫЕ СРЕДЫ: ИСТОРИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Приводятся краткие сведения о применении в строительстве паровоздушных и пневматических молотов и их сравнительные характеристики.

Ключевые слова: пневмоударный механизм, свайный молот, расход воздуха, энергия удара, частота ударов, погружение сваи.

Как известно, для забивания сваи служил копер — специализированный подъемник, применяемый для подъема и сбрасывания ударной части молота. До XIX в. в строительстве сваебойные устройства приводились в движение вручную, а также с помощью лошадей и водяных двигателей [1].

Применение энергии пара позволило повысить ударную мощность молота. Паровые копры-молоты оказались весьма эффективными, но собственно паровой котел существенно усложнял конструкцию. Более широкое использование паровоздушных молотов для забивки свай относится к 30-м гг. [2].

В 1888 г. киевский инженер С.А. Арциш создал паровой молот с полуавтоматическим парораспределением. В следующем году русскому изобретателю инженеру С. Мусницкому был выдан патент на молот с автоматическим парораспределением. Такими молотами, обеспечивавшими повышенную частоту ударов, пользовались в нашей стране в конце XIX — начале XX в.

**Сравнительный анализ технических характеристик молотов.** Если паровые, паровоздушные машины ударного действия в XXI в. уступают место в конкуренции с дизельными двигателями внутреннего сгорания (ДВС) и машинам с гибридными двигателями (дизель-электрическими), то электрические машины ударного действия пока не могут составить конкуренцию гидравлическим и пневматическим машинам и машинам с ДВС.

Целесообразно провести сравнение двигателей пневмоударных и ДВС в машинах (молотах) по двум критериям: по массе ударной части и энергии единичного удара (табл. 1).

Предварительные исследования показывают, что по энергетическим показателям пневматические молоты являются конкурентоспособными с другими типами молотов. Поэтому поиски пневмоударного механизма, обладающего более предпочтительными характеристиками, заслуживают внимания.

По критерию — удельный расход воздуха целесообразно сравнить только пневматические молоты [1], что покажет направленность дальнейших теоретических и практических работ по созданию пневматических молотов нового поколения (табл. 2).

Таблица 1

Параметры	Молоты			
	навесной пневмомолот ИГД СО РАН [2]	навесной пневмомолот НГАСУ (Сибстрин) [3]	штанговый молот с ДВС*	трубчатый молот с ДВС*
Масса ударной части, кг	32...70	12...48	100...2500	1250...5000
Энергия удара, Дж	1300...2400	600...2400	1472...29430	22073...88290
Частота ударов, Гц	8,3...5,4	8,96...5,48	1,67...1,00	0,92...0,72
Мощность ударная, Вт	10790...12960	5376...13152	2458...29430	20307,2...63568,8

\* Бауман В.А. Строительные машины: Справочник в 2 т. Т. 1: Машины для строительства промышленных, гражданских, гидротехнических сооружений и дорог. 1976. 502 с.

Таблица 2

#### Диапазоны изменений значения параметра пневматических молотов

Параметры молота	ПМ <sup>1</sup> ИГД СО РАН [2]	Д <sup>2</sup> НГАСУ (Сибстрин) [3]	Унион Уоркс [1]	Маккернан-Терри [1]
Масса ударной части, кг	32...70	12...48	11...2497	2,5...1645
Энергия удара, кДж	1,3...2,4	0,6...2,4	0,12...73,9	0,14...30,47
Частота ударов, Гц	8,3...5,4	8,96...5,48	9,16...1,5	9,16...1,66
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /с (стен-довый)	0,223...0,278	0,19...0,47	0,035...0,33	0,022...0,3
Расход воздуха за 1 цикл, м <sup>3</sup> /ц	0,0268...0,0515	0,0212...0,0857	0,0038...0,22	0,024...0,1807
Диаметр поршня-ударника, м	0,195	0,125...0,2	0,05...0,356	0,057...0,314
Давление воздуха сетевое, МПа			0,6	

<sup>1</sup> — трехступенчатый трубчатый золотник; <sup>2</sup> — дроссель постоянно открытый;  
<sup>3</sup> — крановый поворотный золотник; <sup>4</sup> — многоступенчатый цилиндрический золотник.

Для сравнения основных технических характеристик молотов в табл. 2 представлены типы пневматических серийных с золотниковым воздухораспределением и разработанных с дроссельным воздухораспределением, а также молотов, изготавливаемых ранее фирмами Маккернан-Терри и Унион Уоркс.

При постоянном давлении, равном 0,6 МПа для всех приведенных выше молотов, соотношением масс ударной части и энергии единичного удара выгодно отличается от молотов фирм Маккернан-Терри и Унион Уоркс пневматический молот с дроссельным воздухораспределением. Также молот с дроссельным воздухораспределением имеет расход воздуха за один цикл, сопоставимый с расходом машин с золотниковым воздухораспределением, но при этом надежность работы дроссельных ПУМ выше, чем у золотниковых. Все это указывает на перспективность применения молотов с дроссельным пневматическим ударным механизмом.

Основной особенностью пневматического молота является то, что ударный импульс образуется сжатым воздухом и перемещение ударной части над наковальней бывает сравнительно невелико (в средних моделях 200–300 мм), что позволяет создать конструкцию всего молота достаточно компактной. Число ударов ударника о сваю в свайных молотах в зависимости от их размера колеблется обычно в пределах от 500

до 1000 ударов в минуту. Такая сравнительно большая частота ударов вызывает в свае непрерывные колебания, которые способствуют более интенсивному ее погружению в грунт. Поэтому, как это показывают многочисленные опытные данные, забивка сваи с помощью свайных молотов происходит значительно быстрее, чем паровыми молотами одиночного действия.

Свайный молот во время работы устанавливается неподвижно на оголовке забиваемой сваи и при ее погружении совместно с ней опускается и по существу не требует применения дополнительных приспособлений, кроме приспособления для подъема и установки самой сваи. При работе свайного молота необходимо только поддерживать его на оголовке сваи, что при малых размерах молота может быть исполнено простейшими приспособлениями, а при более крупных размерах молота — установкой в направляющих с канатной подвеской в копровых устройствах.

По принципу работы пневматические свайные молоты могут быть разделены на два основных типа [2] и более подробно рассмотрены в классификации [3]:

1) свайные молоты с неподвижным поршнем-воздухораспределителем, но с подвижным цилиндром-корпусом, исполняющим в данном случае роль бойка (ударника);

2) свайные молоты с неподвижным цилиндром-корпусом, но с подвижным поршнем-распределителем, исполняющим роль бойка (ударника).

Примером конструкции свайного молота первого типа является конструкция свайного молота системы Губерта [2]. Следует отметить, что масса подвижного цилиндра-корпуса составляет от 15 до 25 % от полной массы всего молота.

Примером конструкции пневматического свайного молота с неподвижным цилиндром-корпусом и с золотниковым воздухораспределением на цилиндре-корпусе подвижным бойком-ударником является конструкция весьма распространенного молота завода Маккернан-Терри и Унион Уоркс [2].

**Вывод.** Таким образом, начиная со второй половины XIX в. и по настоящее время создание новых моделей молотов в первую очередь выдвигает задачу повышения единичной мощности молота. Повышение единичной мощности молота достигается двумя путями: увеличением частоты ударов и повышением энергии удара.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Б о г о л ю б о в , А.Н. История механики машин [Текст] / А.Н. Боголюбов. — Киев : Наук. думка, 1964. — 403 с.
2. А р н о л д , Л.В. Строительные пневматические инструменты и компрессоры [Текст] / Л.В. Арнольд. — Л. ; М. : НКТП-ОНТИ, 1936. — 343 с.
3. А б р а м е н к о в , Д.Э. Классификация признаков свайных молотов с пневмоприводом [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, А.С. Зверева, Ю.Э. Малышева / / Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 5. — С. 94–97.

МЕЛЬНИКОВА А.С., асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

ДЕДОВ А.С., ст. препод.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

ГРУЗИН А.В., студ.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

*АБРАМЕНКОВ Д.Э., д-р техн. наук, проф.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено 16.10.11

**Melnikova A.S.**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Dedov A.S.**, senior lecturer, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Gruzin A.V.**, student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

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

## **DEVELOPMENT OF DESIGNS OF HAMMERS FOR IMMERSING OF PILES IN SOIL ENVIRONMENTS: HISTORICAL ASPECT**

Short data on application in the construction of steam-air both pneumatic hammers and their comparative characteristics are resulted.

**Key words:** the pneumoshock mechanism, pile driving hammer, air consumption, impact energy, frequency of blows, pile-sinking.

### REFERENCES

1. Bogolyubov, A.N. History of the Mechanics of Machines [Text] / A.N. Bogolyubov. — Kiev : Naukova dumka, 1964. — 403 p.
  2. Arnold, L.V. Building Pneumatic Tools and Compressors [Text] / L.V. Arnold. — L.; M. : NKTP-ONTI, 1936. — 343 p.
  3. Abramenkov, D.E. Classification of signs of pile hammers with the pneumodrive [Text] / D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov, A.S. Zvereva, Yu.E. Malysheva // News of Higher Education Institutions. Construction. — 2011. — N 5. — P. 94–97.
-

## НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

УДК 711.424(571.1/.5)

д.г. ПЕТРОВ, В.И. ЦАРЁВ

### ПРОГНОЗЫ РАЗВИТИЯ ГОРОДОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СИБИРИ В КОНЦЕ XIX В.

Рассмотрены предпосылки зарождения градостроительного прогнозирования в период строительства Сибирской железной дороги. Выявлены особенности мероприятий, проводившихся для сбора сведений о перспективах развития поселений в Центральной Сибири. Показано значение градостроительных прогнозов в преобразованиях сибирских регионов в XX–XXI вв.

**Ключевые слова:** Сибирская железная дорога, сибирский город, проектный план, планировка города.

Сибирская железная дорога, построенная в 1890-х гг., стала значительным градоформирующим фактором накануне XX в. В процессе ее проектирования и строительства проводились обширные изыскания, связанные с определением перспектив экономического развития многих районов и населенных мест, которые заложили основу дальнейших промышленных и социальных преобразований Сибири.

В середине 1890-х гг. были сделаны попытки осуществления единых градостроительных мероприятий, суть которых заключалась в «заблаговременном составлении планов, имеющих возникнуть вдоль Сибирской железной дороги городов и поселений» [1]. Эту идею выдвинул и надеялся ее осуществить архитектор Д.А. Лебедев, преподававший в петербургских институтах гражданских инженеров и инженеров путей сообщений. В июне 1895 г. он представил в министерство путей сообщений докладную записку, в которой указывал на отсутствие предварительных планов поселков и местечек по линиям железных дорог в Европейской России. Ссылаясь на передовой опыт Североамериканских Соединенных Штатов, он предлагал обеспечить возникавшим на линии строящейся Сибирской железной дороги поселкам и городам наиболее удобные в экономическом и санитарном отношении условия существования. К ним следовало отнести в первую очередь достаточную ширину улиц, а также расположение фабрик, заводов и железнодорожных мастерских по возможности ниже по течению рек, чем будущие поселения [2].

Для выполнения своих замыслов архитектор Д.А. Лебедев предлагал летом 1895 г. осмотреть лично расположения станций от Челябинска до Красноярска и затем, используя данные, собранные на местах, сведения, имевшиеся в министерствах, выработать планы городов и селений с привлечением студентов Института гражданских инженеров. В министерстве путей сообщений и комитете Сибирской железной дороги придали весьма серьезное значение вопросу о возможно лучшем и целесообразном расположении поселений около станций строящейся дороги. Было

принято решение до поездки Д.А. Лебедева в Сибирь провести предварительные работы на местах, которые, по мнению столичных чиновников, весьма облегчили бы исследование архитектора. Докладная записка Д.А. Лебедева была направлена на рассмотрение начальникам сибирских губерний. При этом им поручалось до весны 1896 г. озабочиться выяснением тех пунктов вдоль железной дороги, в которых в ближайшем будущем следовало ожидать возникновения городов или значительных поселений, а также представить свои соображения относительно порядка составления для них проектных планов [3].

В сибирских губерниях местное начальство предприняло активные меры по сбору сведений о перспективных населенных пунктах. В Енисейской губернии, в ее западной части между городами Ачинск и Красноярск, по мнению чиновников, едва ли можно было ожидать возникновение административного пункта, так как по естественным и экономическим причинам ни одно из селений, находившихся по линии железной дороги, не имело в то время внутренних стимулов развития. Учитывая естественные условия, в пределах Енисейской губернии железнодорожный путь пересекут только три крупных реки: Чулым, Енисей и Кан. В этих транспортных узлах уже находились города Ачинск, Красноярск и Канская. Остальные реки — горные и естественных подъездных путей представлять не могли, поэтому нельзя было ожидать новых промышленных селений в местах пересечения этими реками железной дороги.

Вместе с тем в ходе проводимых исследований впервые появилось определение района влияния железной дороги, значительно расширившее границы сбора сведений о перспективах развития поселений. Например, чиновники усматривали возможность наметить как будущий уездный город селение Новоселово Минусинского округа, располагавшееся от Красноярска вверх по р. Енисей в 220 верстах. Благоприятными перспективами развития характеризовались селения Ужурское и Солгонское Ачинского округа (первое в 136 верстах, а второе в 90 верстах от Ачинска). Что же касалось вопроса о возникновении населенных пунктов по Енисею между Красноярском и Енисейском, а также по Ангаре, то его разрешение, согласно исследованиям, находилось в зависимости от успехов развития речного судоходства.

Впервые в практике изучения сибирских городов местные власти обратили внимание на перспективы преобразований пригородных селений, обусловленные влиянием железной дороги. Выдвигалось предположение о возможном слиянии в одно селение двух таких деревень — Маганской и Свищевской, располагавшихся друг от друга в 2 верстах. Среди перспективных селений в документах упоминались пригородные деревни Торгашино (от Красноярска в 6 верстах, от линии железной дороги около одной версты) и Минино (в 12 верстах от Красноярска, 1/2 версте от железной дороги). Особое внимание губернских чиновников привлекла д. Базаиха, находившаяся на правом берегу Енисея против Красноярска и являвшаяся дачной местностью для городских жителей. После устройства железной дороги, как указывалось в собранных материалах, она имела все условия превратиться в рабочую слободу-пригород, и к ней тогда должна быть применена планировка городского поселения.

В восточной части Енисейской губернии, по выявленным сведениям, в местности, прилегавшей к железной дороге, значительную будущность могли иметь селения Уярское (Спасо-Преображенское), находившееся в 4 верстах от большой железнодорожной станции, и Конторское, располагавшееся на р. Бирюсе, что позволяло видеть в нем будущий административный пункт — уездный город.

В Иркутской губернии в тот же период проводились не менее активные, чем в Енисейской губернии, мероприятия по сбору сведений о перспективах развития городов иселений. С проведением железной дороги предполагалось дальнейшее развитие с. Бирюсинского, находившегося на границе двух губерний. Его развитию способствовали такие факторы, как удобство окружающей местности для скотоводства, сенокошения и хлебопашества, что давало возможность селу стать центром хлебной производительности, и близость к железнодорожной станции Тайшет.

Вместе с тем из всех прижелезнодорожных местностей, располагавшихся в Нижнеудинском округе, по экономическим соображениям были выделены только четыре наиболее перспективных пункта и г. Нижнеудинск.

Первая местность находилась вблизи будущей станции Тайшет. В середине 1890-х гг. здесь не было никакого населенного пункта. Между тем поблизости от нее имелась группа больших селений (Бирюса, Конторское, Старый Окульшет или Кочергино), имевших значение крупных центров хлебного производства и торговли, что позволяло прогнозировать развитие станции и нового поселения при ней как центрального склада хлебных запасов.

Вторая из выбранных местностей располагалась к востоку от первой около железнодорожной станции Камышет. В то время там строились два больших завода — цементный и кирпичный. Одновременно в окрестностях открываемой станции производились изыскания для разработки медной руды. Это, по мнению исследователей, способствовало приливу в новое поселение рабочего народа в значительных массах.

Далее к востоку по железной дороге находился Нижнеудинск. Станция проектировалась от города на расстоянии около двух верст. При ней организовывались железнодорожные мастерские. Перспективы местной промышленности связывались с развитием кирпичного и цементного производств. Эти факторы давали повод рассчитывать на то, что местность, примыкавшая к будущей станции, может сделаться средоточием торговой и промышленной деятельности, в непродолжительном времени должна будет застраиваться и войти в состав городского поселения.

Следующей была намечена местность около станции Тулун с прилегавшим к ней селением Тулуновским. Будущее развитие этой местности определялось существовавшим в окрестностях селения обширным хлебопашеством, значительной торговлей (в чем с. Тулуновское превосходило не только другие селения, но и многие города в Сибири) и центральным положением его среди других поселений.

Последняя из перспективных местностей, выделенных в Нижнеудинском округе, находилась вблизи станции Куйтун. По собранным сведениям, она имела задатки блестящей будущности, которые определялись обширными размерами хлебного производства и значительными торговыми отношениями с Приленским краем и Якутской областью.

В Иркутском округе вдоль линии железной дороги по прогнозам предполагалось возведение новых поселений вблизи станций Мальтинской и Тельма. В их описаниях обращалось внимание на природные характеристики. Например, преимуществом первой из указанных станций являлось ее расположение на р. Белой. Рассматриваемая местность около селения Тельмы удовлетворяла требованиям для заведения населенного пункта и даже города, так как она находилась на открытой и возвышенной равнине р. Ангары, имела чистый и здоровый воздух, освежаемый со всех сторон свободными ветрами.

От Иркутска на восток, на Кругобайкальской железной дороге, сведения о местах расположения станций к тому периоду еще отсутствовали

ввиду продолжавшихся изысканий, что не позволило наметить какие-либо прогнозы.

По вопросу о составлении планов на города и селения, располагавшиеся и предполагаемые к возникновению около линии Сибирской железной дороги, возникли разные мнения в городских управлениях, рассматривавших докладную записку Д.А. Лебедева.

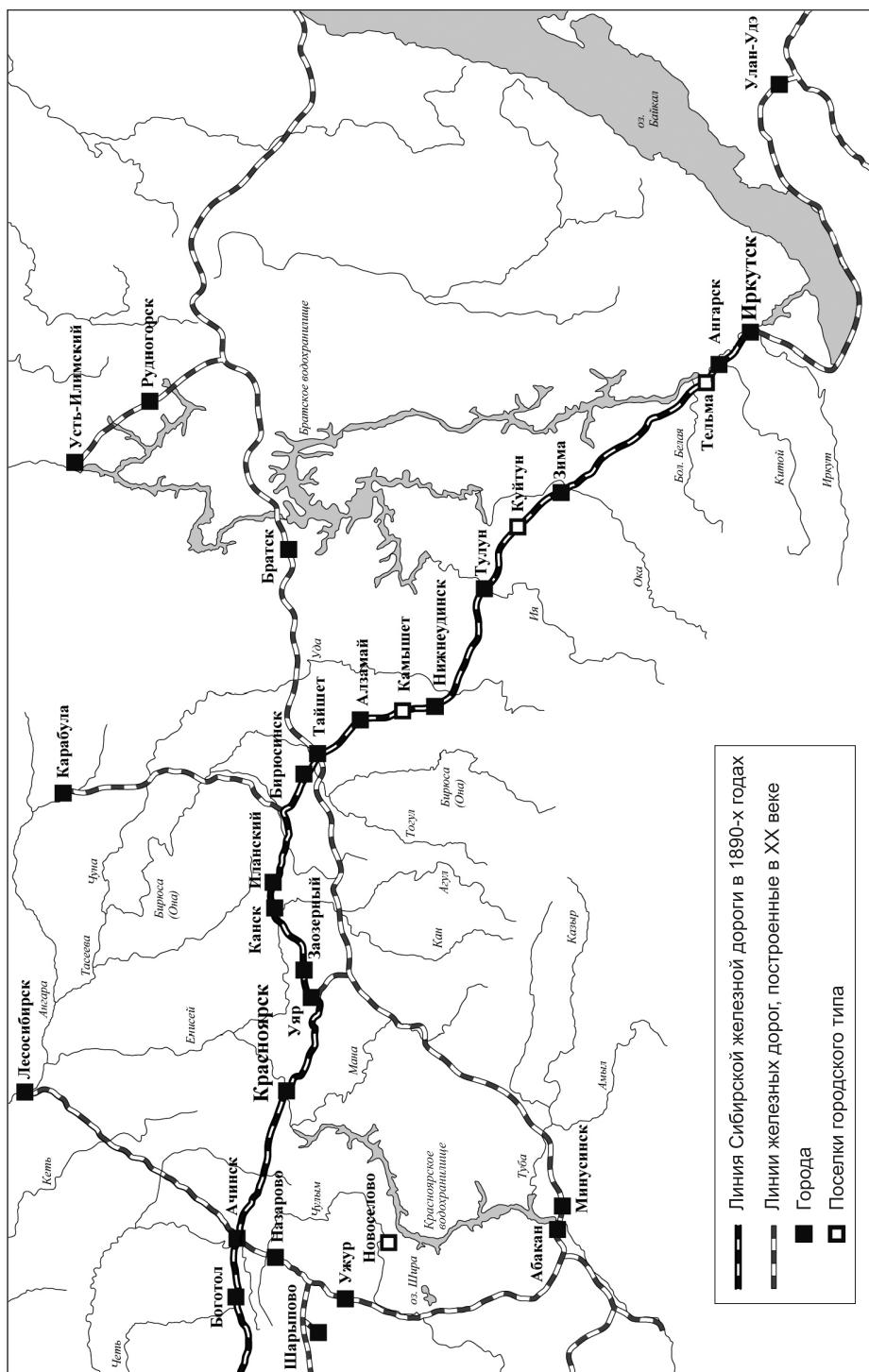
Ачинская и Канская городские думы признали желательным, чтобы пересоставление планов их городов было произведено по указаниям архитектора Д.А. Лебедева. Вместе с тем Красноярская дума отказалась от составления плана города, высказывая мнение, что данное предложение относится лишь до городов, имеющих возникнуть по линии Сибирской железной дороги. Не оказали должного воздействия и дополнительные пояснения Енисейского губернатора, который указал думе на то, что предложение Д.А. Лебедева понято ошибочно, так как в недалеком будущем городские постройки в Красноярске, дойдя до границы земли, отчужденной под постройку дороги, заставят образовать новые кварталы и по другую сторону полосы отчуждения. Предложение было отклонено.

Интересные соображения по данному вопросу изложили члены Нижнеудинской городской думы. Они признали желательным осуществить планировку города на основах современного научного знания. Однако высказали пожелание, чтобы проект планировки будущего города имел значение образцового руководства авторитетного по его внутреннему достоинству, но не обязательного к непременному исполнению во всех частностях выработанного плана.

Возникшие в городских управлениях разногласия по вопросу о порядке составления планов определялись в первую очередь местными интересами, разными по уровню развития городов. Услуги архитектора Д.А. Лебедева готовы были принять города, не имевшие архитектурно-инженерных кадров, а управлении губернских городов полагались на собственных специалистов и на ранее установленный порядок.

Учитывая сложившуюся ситуацию, губернское начальство также склонялось к сохранению прежнего регламента составления и утверждения планов. Например, Енисейский губернатор в донесении сообщал о том, что селения, возникавшие в Енисейской губернии, строились только по планам, составленным на месте чиновниками губернской чертежной. При этом обязательно было участие выборных представителей от крестьянского общества, желавшего поселиться в известной местности. В ходе работ принимались во внимание все особенности местоположения поселения, возможность его расширения впоследствии, качество почвы, количество воды и леса. Такие проектные планы новых селений, рассмотренные губернской чертежной, представлялись казенной палатой на утверждение губернатору, который в свою очередь принимал решение после рассмотрения этих планов губернским строительным отделением. В составленные таким образом планы, по мнению губернатора, едва ли могли вкрадаться значительные погрешности против предъявляемых наукой и жизнью требований санитарных и пожарной безопасности. В связи с этим он считал целесообразным удержать вышеописанный порядок и в будущем при составлении планов, имеющих возникнуть, как сельских, так и городских поселений.

Несмотря на желание сибирских властей оказать посильное содействие правительству в сборе материалов, воплотить мысли архитектора Д.А. Лебедева об общем проекте планировки городов и селений Сибири не удалось. Поездка архитектора в сибирские губернии не состоялась. Вместе с тем проведенные мероприятия заставили представителей всех уровней власти и специалистов взглянуть по-новому на проблемы развития сибирских территорий. Сибирская железная дорога стимулировала



Железные дороги и городские поселения Центральной Сибири в начале XXI в.

проникновение научно-технического прогресса в архитектурно-градостроительную практику в восточных районах страны. Вдоль рельсовых путей протянулась цепочка новых городских поселений, формирование которых определялось уже современными требованиями планировки и застройки (рисунок).

Прогнозы 1890-х гг. о перспективах развития поселений в Центральной Сибири во многом оправдались. В XX в. из населенных пунктов, вы-

деленных при обследовании, городской статус получили Ужур, Уяр, Бирюсинск, Тайшет, Тулун; активно развивались Нижнеудинск, Иркутск и Красноярск, в территориальную структуру которого вошли почти все упомянутые ранее пригородные селения. Поселками городского типа стали Новоселово, Камышет, Куйтун и Тельма. Наряду с отмеченными городскими поселениями под влиянием Сибирской железной дороги появились десятки новых городов и поселков. В начале XXI столетия вновь актуальным стал вопрос о прогнозах развития регионов Сибири, в решении которого представляется весьма ценным изучение опыта градостроительной практики предшествующих эпох.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Государственный архив Красноярского края (ГАКК). Ф. 161. Оп. 2. Д. 1921. Докладная записка архитектора Лебедева о составлении планов городов, предполагаемых к постройке вдоль Сибирской железной дороги. 1895–1896. — 17 л.
2. Государственный архив Красноярского края (ГАКК). Ф. 595. Оп. 59. Д. 106. О составлении планов строительства городов и селений в районе Сибирской железной дороги. 1895–1896. — 93 л.
3. Государственный архив Иркутской области (ГАИО). Ф. 31. Оп. 3. Д. 64. (Оц-36). О составлении планов будущих городов и селений в районе Сибирской железной дороги. 1895–1896. — 97 л.

ПЕТРОВ Дмитрий Геннадьевич, асп.; E-mail: giift@mail.ru

Институт архитектуры и дизайна Сибирского федерального университета,  
г. Красноярск

ЦАРЁВ Владимир Иннокентьевич, д-р архит., проф.; E-mail: vits\_2004@mail.ru

Институт архитектуры и дизайна Сибирского федерального университета, директор  
Красноярского представительства НИИТИАГ РААСН

Получено 24.10.11

**Petrov Dmitriy Gennadevich**, post-graduate student; E-mail: giift@mail.ru, Institute of architecture and design of the Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Tsaryov Vladimir Innokentevich**, doctor of architecture, professor; E-mail: vits\_2004@mail.ru, Institute of architecture and design of the Siberian Federal University, the director of Krasnoyarsk representation NIITIAG RAASN, Russia

## THE PROGNOSSES OF DEVELOPMENT OF TOWNS OF THE CENTRAL SIBERIA IN THE END XIX-th CENTURY

Features of the actions, which were spent for collecting of data about perspectives of development of towns in central Siberia are revealed.

Meaning of planning prognoses in transformations of the Siberian regions in XX–XXI centuries is shown.

**Key words:** Siberian railway, the Siberian town, the design plan, the town planning.

## REFERENCES

1. The State archive of Krasnoyarsk region. F. 161. In. 2. Д. 1921. The report of architect Lebedev about drawing of plans of the towns assumed to construction along the Siberian railway. 1895–1896. — 17 sheet.
2. The State archive of Krasnoyarsk region. F. 595. In. 59. Д. 106. About drawing of plans of towns and settlements around the Siberian railway. 1895–1896. — 93 sheet.
3. The State archive of the Irkutsk region. F. 31. In. 3. Д. 64. (36). About drawing of plans of the future cities and settlements around the Siberian railway. 1895–1896. — 97 sheet.

**УДК 711.4.-112**

**С.Ф. ЯМАЛЕТДИНОВ**

## **ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО: ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАКРЫТЫХ ГОРОДОВ АТОМНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

Рассматриваются вопросы организации проектирования закрытых городов атомной промышленности. Проектирование закрытых городов атомной промышленности долгое время проходило вне влияния общегосударственной системы проектирования. Для ведомственного градостроительства использовались собственные расчетные нормативы и проектные решения.

**Ключевые слова:** ВНИИПИЭТ, градостроительство, ГСПИ № 11, закрытый город, Красноярск-26, Ленгипрострой, Томск-7, Челябинск-40.

Во второй половине 1940-х — первой половине 1950-х гг. в СССР формируется особая система поселений для обслуживания предприятий по производству атомного оружия. Засекреченность военной атомной промышленности определила закрытое положение городов и полную изоляцию их жителей от прилегающих территорий. Неудобства режимных требований и негативные стороны производственной деятельности компенсировались высоким уровнем социально-бытового и культурного обслуживания. Благоустроенное архитектурное пространство города также способствовало организации комфортной среды проживания.

Проектирование атомных предприятий и закрытых городов при них было поручено Государственному союзному проектному институту (ГСПИ) № 11, расположенному в Ленинграде. В связи с этим в сентябре 1945 г. вышло специальное постановление правительства, согласно которому ГСПИ № 11 вошел в структуру Первого главного управления (ПГУ) для участия в работе по созданию ядерного оружия. Привлечение ГСПИ № 11 к решению атомной проблемы было не случайно и связано с тем, что данный институт уже имел некоторый опыт проектирования крупных промышленных объектов военного назначения.

К моменту перехода института в ведение ПГУ общая численность сотрудников составляла 238 человек, а организационная структура имела довоенный вид и строилась по принципу специализированных отделов. С переходом на новую тематику проектных работ в институте были сформированы дополнительные подразделения и отделы (рис. 1). Значительно выросла общая численность сотрудников института за счет вновь принятых специалистов. Быстрому пополнению института инженерно-техническими работниками способствовало специальное постановление правительства о беспрепятственном переходе специалистов, ранее работавших в ГСПИ № 11 и изъявивших желание перейти на старое место работы.

Произошедшие изменения в организационной структуре института и увеличение числа разносторонних специалистов позволили ускорить процесс проектирования и освоения технологически сложных атомных объектов. Уже в начале 1946 г. стало возможным начать строительство первых предприятий, которые размещались в разных регионах страны.

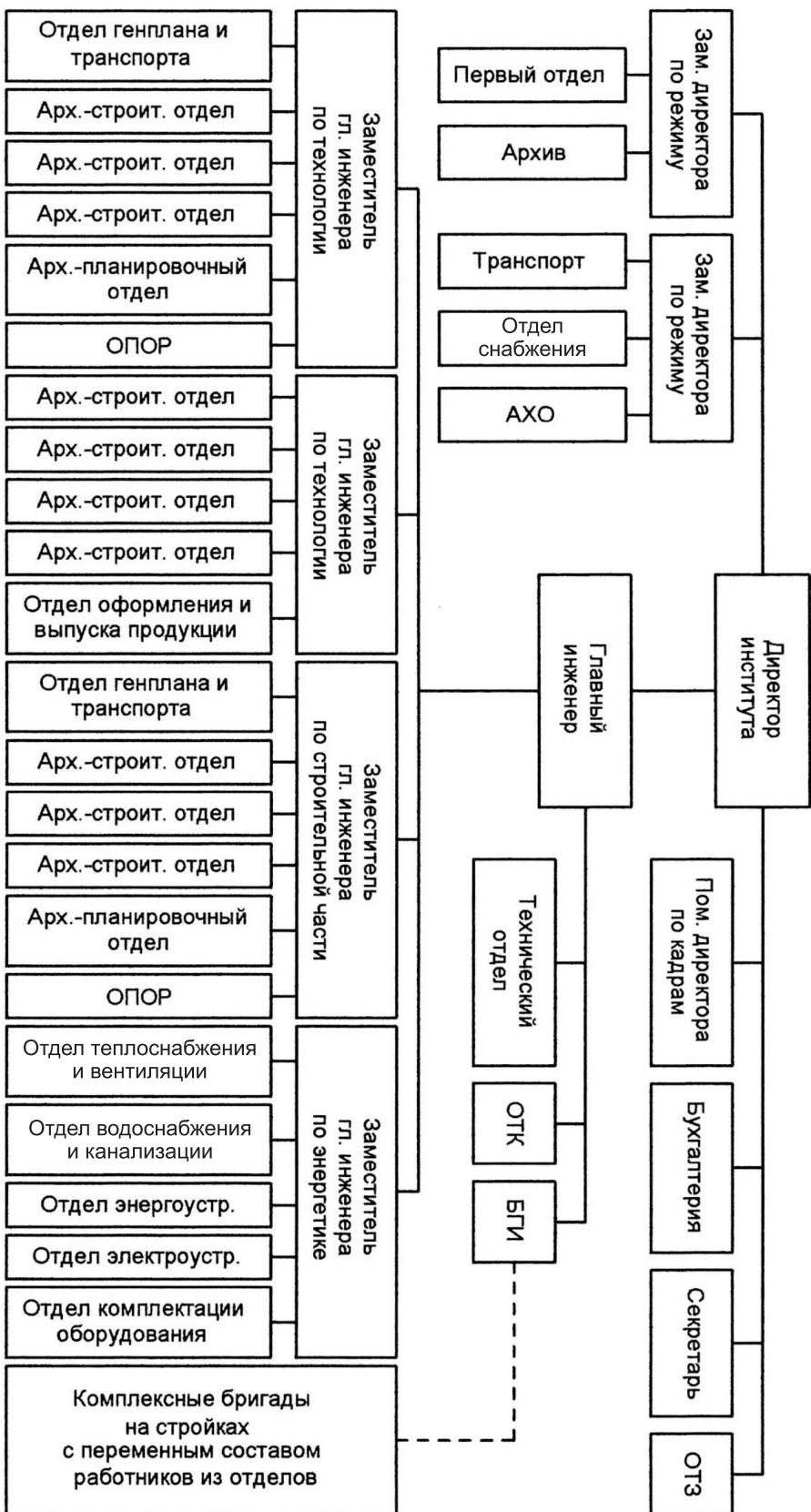


Рис. 1. Структура ГСПИ № 11 после перехода в ведение ПГУ

Так, в Горьковской области строилось Конструкторское бюро № 11, на которое возлагались многопрофильные исследования по разработке всех компонентов и систем атомной бомбы. На Урале велось освоение Комбината № 813 для получения оружейного урана в Свердловской области и плутониевого Комбината № 817 в Челябинской области. Кроме того, в конце 1947 г. на севере Свердловской области намечалось строительство завода № 418 для получения высокообогащенного урана электромагнитным способом. Одновременно со строительством предприятий началось строительство закрытых поселений для обслуживающего персонала.

Для решения вопросов планировки и застройки рабочих поселков при предприятиях атомной промышленности в институте в 1946 г. был организован самостоятельный архитектурно-планировочный отдел (отдел № 24). Специалисты отдела выполняли работы по составлению схем генеральных планов и проектированию жилых и общественных зданий.

Интенсивное строительство сразу нескольких крупных атомных предприятий с принципиально разными технологическими процессами заставляло проектировщиков института сосредоточить свое внимание, прежде всего, на выполнении необходимого объема проектных работ по промышленной части. К поселкам применялась упрощенная методика проектирования, которая допускала начало проектных работ до получения необходимых исходных данных. Проектные материалы выдавались в сокращенном объеме и не соответствовали установленным общегосударственным требованиям. Возникла необходимость в доработке проектов и внесении изменений, которые осуществлялись уже непосредственно на месте строительства выездными бригадами института.

В советской практике градостроительного проектирования город рассматривался в неразрывной связи с производством. Все градостроительные параметры исходили из характеристик основного производства. Производство ядерных материалов являлось совершенно новой отраслью промышленности и не имело каких-либо аналогов. Трудно было определить градостроительный потенциал предприятий, оставалась неясной структура градообразующих кадров и удельное соотношение их в сфере производства и обслуживания. Отсюда исходили неясные представления о составе и количестве населения, функционально-планировочной организации и возможностях развития закрытых поселений.

Первоначально параметры планировочных элементов определялись из строго установленной штатной численности промышленного объекта, без какого-либо территориального резерва. Генеральные планы строительства предприятий отрасли предусматривали сооружение рабочих поселков на 2,5–5 тыс. человек. Предполагалось, что работники предприятий будут периодически заменяться, а значит, их семьям следовало оставаться по месту постоянного жительства [2]. Исходя из этого, поселки представлялись малочисленными, изолированными и законченными жилыми образованиями с простейшей социально-бытовой инфраструктурой и архитектурно-пространственным решением. Так начинали свою жизнь закрытые города, строившиеся в период с 1946 по 1949 г.: Арзамас-16, Свердловск-44, Свердловск-45, Челябинск-40.

В 1949 г. в СССР прошло успешное испытание первого ядерного заряда, после чего встал вопрос об увеличении объемов производства ядерных материалов. Советское правительство поставило задачу расширения действующих предприятий и строительства новых. Размещение новых предприятий велось как в уже «освоенных» регионах, так и в новых. Период с 1949 до середины 1950-х гг. определил начало строительства Томска-7, Красноярска-26, Златоуста-36, Пензы-19, Челябинска-70 и Красно-

ярска-45. Интенсивное развитие военной атомной промышленности привлекло за собой быстрое развитие закрытых поселков, которые во второй половине 1950-х гг. получили официальный статус городов.

Изменение статуса закрытого поселения от небольшого рабочего поселка к городу средней величины привело не только к пересмотру применявшихся ранее архитектурно-планировочных решений, но и к изменению всего комплекса работ по градостроительному проектированию.

Если для проектирования промышленных объектов достаточно было имеющихся кадров института, то в разработке проектов планировки городов ощущалось отсутствие глубоких профессиональных знаний, опыта и необходимых специалистов. Засекреченность проектных материалов делало невозможным профессиональное общение со специалистами за пределами института. Исключалась возможность консультаций и помочь опытных проектировщиков других проектных организаций. Содержание проектных работ ГСПИ № 11 составляло государственную тайну, разглашение которой в какой бы то ни было форме лицам или организациям, не имеющим к этому непосредственного отношения, воспрещалось.

Проблема формирования в институте коллектива архитекторов-планировщиков решалась через привлечение специалистов из других проектных организаций градостроительного профиля. Источником пополнения кадров служили специализированные проектные организации, такие как Ленгипрогор, Горстройпроект и др. Однако и эти институты в послевоенное время испытывали недостаток в специалистах в связи с проведением масштабных работ по восстановлению разрушенных городов. Определенные трудности в приеме на работу опытных специалистов возникали и со стороны ГСПИ № 11. Многих пугала строгая процедура отбора, проходившая с участием режимного отдела института. По тем или иным причинам было отказано в работе архитекторам В.А. Витману, В.А. Гайковичу, И.И. Фомину и другим ленинградским архитекторам [1].

Тем не менее из других проектных организаций на работу в ГСПИ № 11 были переведены архитекторы с опытом работы в решении вопросов планировки и застройки населенных мест. Из Ленгипрогора в 1948–1949 гг. были приглашены архитекторы-планировщики А.С. Никущенко и М.А. Белый, а по жилищно-гражданскому строительству архитектор Я.М. Зеленый. В 1949 г. через ленинградский Горком КПСС был переведен руководитель архитектурно-планировочной мастерской Ленгипрогора, кандидат архитектуры А.И. Власов и назначен главным архитектором архитектурно-строительного отдела.

Значительное пополнение архитекторских кадров происходило за счет привлечения выпускников ленинградских вузов — Ленинградского инженерно-строительного института и Института живописи, скульптуры и архитектуры им. И.Е. Репина Академии художеств СССР. Ежегодно в этом направлении проводилась специальная работа по своевременному отбору и надлежащему оформлению молодых специалистов. В период с конца 1940-х гг. — начала 1950-х гг. на работу в архитектурный отдел института поступили А.И. Домнин, Н.А. Комкова, И.И. Ласкарева, И.Б. Орлов, В.С. Пахомов, А.А. Рутковский, Г.П. Степанов, В.Н. Суховарова, Ю.С. Ушаков и др.

Уже к концу 1949 г. в работе архитектурно-строительного отдела ГСПИ № 11 было задействовано 42 человека. При этом отдел структурно оформился в группы (планировки и застройки, объемного проектирования, инженерно-конструкторских решений), каждая из которых решала свой узкоспециализированный круг вопросов.

Качественные изменения произошли в методике градостроительного проектирования, которые нашли отражение в составе, объеме и содержании

ния проектных материалов. Привлечение к работе опытных специалистов градостроительного профиля позволило разработать собственные нормативно-методические указания<sup>1</sup>, которые использовались взамен «недоступных» общегосударственных нормативов и учитывали специфику проживания на закрытой территории вблизи атомных объектов. Для оптимизации жилого строительства была запроектирована собственная серия типовых трех- и четырехэтажных жилых домов<sup>2</sup>, основанная на единой конструктивно-планировочной схеме. Данная серия применялась до начала 1960-х гг. только в закрытых городах атомной промышленности.

К середине 1950-х гг. назрела необходимость в перемене организационной работы института с переходом на линейную схему управления (рис. 2). Это было вызвано большим ростом специализированных отделов, которые становились трудно управляемыми и не отвечали требованиям рациональной организации проектного процесса. Теперь основными производственными подразделениями института становятся бюро комплексного проектирования (БКП), объединяющие в своей структуре необходимые отделы и подразделения по основным специальностям.

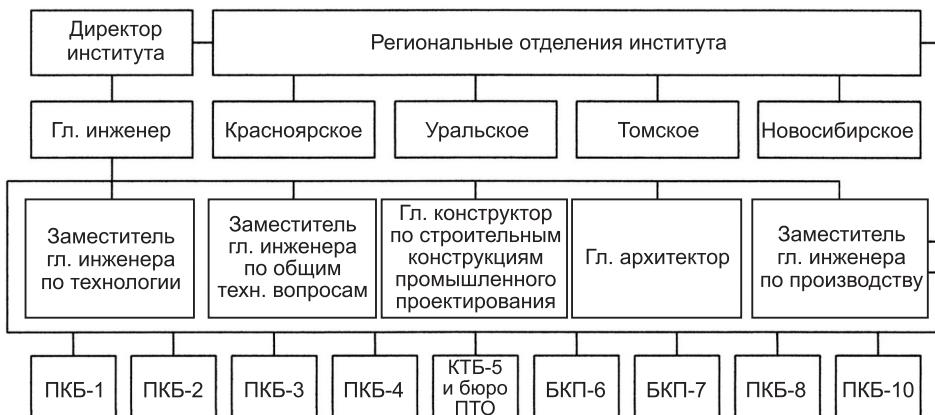


Рис. 2. Структура института «Ленгипрострой» после 1955 г.

В 1956 г. на основе архитектурно-строительного отдела было создано бюро комплексного проектирования городов и жилищно-гражданского строительства (нач. В.Н. Иванов, зам. нач. Г.А. Иванов, гл. архит. А.И. Власов). Структуру БКП № 6 составили отдел генерального плана (рук. М.А. Белый), отдел объемного проектирования (рук. Б.Г. Машин), инженерно-технический отдел.

В период с 1946 по 1968 г. подразделение увеличилось по численному составу и объему работ примерно в 27 раз [1]. В 1970-е гг. коллектив БКП № 6 являлся одним из крупнейших в стране, способных комплексно решать все многообразные вопросы градостроительства, от разработки генеральных планов новых городов до проектов благоустройства и озеленения отдельных районов, от создания проектов жилых и крупных обще-

<sup>1</sup> Нормативно-методические указания были разработаны главным архитектором архитектурно-строительного отдела А.И. Власовым при участии инженера-экономиста А.А. Шипко: «Нормы проектирования городов ВОХра» (1951), «Нормы проектирования городов ведомства» (1951), «Указания по санитарной очистке городов» (1963).

<sup>2</sup> Типовая серия жилых домов в составе 22 типов и подтипов была разработана под руководством заместителя главного инженера предприятия В.Н. Иванова. В разработке серии приняли участие архитекторы А.И. Домнин, Я.М. Зеленый, Н.А. Комкова, Н.И. Мухин, И.Б. Орлов и др.

ственных зданий до разработки их интерьеров, элементов дизайна и произведений монументально-декоративного искусства.

Большой объем архитектурно-планировочных работ, связанный с высоким числом проектируемых городов, непрерывным развитием объектов производства и городов, привел к необходимости создания проектных организаций на территории самих закрытых городов. Образование полноценных филиалов головного института в закрытых городах существенным образом сказалось на улучшении процесса проектирования. Такие филиалы были образованы в городах, которые имели наибольший потенциал развития. В 1956 г. филиалы образованы в Красноярске-26 и Томске-7, в 1959 г. филиал института начал работу в Челябинске-40. В это же время в ГСПИ № 11 было создано бюро главных архитекторов для ведения авторского надзора. За каждым городом закреплялся опытный архитектор института, который долгое время проводил непосредственно на площадке строительства. Это позволяло напрямую общаться с проектировщиками, работающими в самих городах, проводить консультации, следить за строительством отдельных объектов, вести общее руководство застройкой и реализацией генплана.

Структура проектных институтов в закрытых городах строилась по специализированному признаку. Каждое производственное подразделение разрабатывало отдельные части проекта по специальности. В состав подразделения входили: архитектурно-строительный отдел гражданского проектирования, архитектурно-строительный отдел промышленного проектирования, отдел генерального плана и транспорта [3].

В связи с реорганизацией головного института в 1976 г. филиалы в закрытых городах были преобразованы в региональные отделения: в Красноярске-26 — Красноярское отделение ВНИПИЭТ (КО ВНИПИЭТ), в Томске-7 — Томское отделение ВНИПИЭТ (ТО ВНИПИЭТ), в Челябинске-40 — Уральское отделение ВНИПИЭТ (УО ВНИПИЭТ).

В региональных отделениях института выполнялся весь комплекс проектных работ, необходимых для полноценного развития городов, начиная от проекта генерального плана и заканчивая проектами жилых групп, отдельных зданий и сооружений. Специалисты головного института также принимали участие в проектировании в виде консультаций и предложений во время предварительных просмотров. Вопросы проектирования и строительства городов неоднократно поднимались на ежегодно проводимых ведомственных конференциях. Это позволяло обмениваться опытом в решении актуальных вопросов градостроительства и архитектуры, повышать качество проектирования и строительства, раскрывать новые задачи планировки и застройки городов.

Особая система управления атомной промышленностью в силу ее секретности наложила свой отпечаток на процесс проектирования, согласования и утверждения проектов. Ни в какие открытые организации по делам строительства и архитектуры или в другие министерства проектные материалы по закрытым городам на согласования не направлялись. Единственным внешним органом, куда нужно было направлять на согласование генеральные планы городов, было Третье главное управление Минздрава СССР, которое было специально организовано для обслуживания атомной отрасли.

В общегосударственной системе градостроительного проектирования утверждение проектов возлагалось на исполнительные органы советской власти, а также на исполнительные комитеты краевых, областных и городских Советов народных депутатов. Согласование проектов осуществлялось по их указанию соответствующими министерствами, управлениями

ми и инспекциями, а также необходимыми общественными организациями. Как правило, представленные проекты приходилось неоднократно перерабатывать, а затем снова и снова представлять на согласования и утверждения. Многократное представление проекта в разные инстанции затягивало его продвижение до исполнителя, что в свою очередь приводило к задержкам в строительстве и незавершенности принятых архитектурно-планировочных решений.

«Закрытое» положение архитекторов атомных городов освобождало их от участия в принятой общегосударственной системе согласований и утверждений градостроительных проектов. Необходимые просмотры, консультации и экспертизы, а также согласования и утверждения всех проектов планировки и застройки проходили в Главном управлении капитального строительства Министерства среднего машиностроения. Здесь же согласовывались и утверждались объемы финансирования будущего строительства. В проектировании закрытых городов ГУКС «представлял собой и “Госстрой” и органы Советской власти» [1].

Дальнейшие изменения в методике градостроительного проектирования закрытых городов были связаны с участием архитекторов БКП № 6 в проектировании «открытых» городов, где размещались научно-исследовательские или промышленные объекты атомного профиля. Разработка ген-плана Академгородка СО АН СССР под Новосибирском была начата в 1959 г., в последующие годы проектировались города Шевченко, Навои, Сосновый Бор и др. Эти проекты проходили экспертизы, согласования и утверждения по принятой общегосударственной схеме.

Установившиеся контакты с государственными органами по делам строительства и архитектуры повлияли на методику проектирования закрытых городов, которая в 1960-е гг. все больше стала ориентироваться на действующие общегосударственные инструкции и нормативные требования. При этом сами проектные работы по закрытым городам оставались в рамках «совершенно секретно».

Рассматривая вопросы организации процесса проектирования закрытых городов, можно утверждать, что внутри атомного ведомства была создана своя система градостроительного проектирования, которая существовала параллельно общегосударственной системе и долгое время с ней не пересекалась. Самостоятельность ведомственного градостроительства особенно ярко проявилась на начальном этапе проектирования закрытых городов с 1946 и до начала 1960-х гг. Это был период тотального засекречивания всего, что было связано с реализацией советской атомной программы, когда архитекторам ГСПИ № 11 запрещалось разглашать любые сведения о проектной деятельности. Для градостроительного проектирования были разработаны собственные нормативные указания, которые заменяли общегосударственные. Застройка закрытых городов велась по собственным типовым проектам, которые в других городах не применялись.

Несмотря на условия изоляции, проектирование закрытых городов атомного ведомства проходило в рамках последовательно сменяющих друг друга градостроительных концепций в соответствии с общим направлением развития отечественной архитектуры. Независимое от общегосударственного контроля проектирование помогало быстрому продвижению проектов от архитектора к застройщику, минуя многочисленные ступени согласований и утверждений. Таким образом, решалась задача создания комфортного проживания на закрытой территории путем изменения действовавших расчетных нормативов в пользу более высокого

уровня обеспеченности жильем, культурно-бытовым и коммунальным обслуживанием.

Особая система управления военной атомной промышленностью, при которой заказчики, проектировщики и застройщики принадлежали одному ведомству, помогала оперативно решать любые вопросы проектирования и строительства. Учитывая значительные объемы финансирования закрытых городов, становится очевидным, что в атомном ведомстве были созданы наиболее благоприятные условия для комплексного проектирования и полной реализации проектных решений. Внутриведомственное градостроительное проектирование отвечало особому статусу закрытых городов, где располагались главные производства военно-промышленного комплекса страны.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Власов, А.И. Проектирование городов атомной промышленности. 1946–1968 [Текст] / А.И. Власов, В.Н. Иванов, И.Б. Орлов // Арх. ГИ ВНИПИЭТ. Ф. 1. Оп. 1. Ед. хр. 1588. 104 л.
2. Новоселов, В.Н. Создание атомной промышленности на Урале [Текст] : дис. ... д-ра ист. наук / Владимир Николаевич Новоселов. — Челябинск, 1999. — 506 с.
3. Ямалетдинов, С.Ф. Организация проектной деятельности в городе Железногорске Красноярского края [Текст] / С.Ф. Ямалетдинов // Город: прошлое, настоящее, будущее : материалы междунар. науч.-практ. конф. — Иркутск : Иркут. гос. техн. ун-т, 1998. — С. 175–177.

**ЯМАЛЕТДИНОВ Сергей Федорович, доц.; E-mail: Yama-71@mail.ru**  
Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Получено 08.10.11

**Yamaletdinov Sergey Fedorovich**, assistant professor; E-mail: Yama-71@mail.ru, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

#### PARALLEL CITY PLANNING: DESIGN MANAGEMENT FOR ATOMIC INDUSTRY TOWNS FORBIDDEN FOR WESTERNS

The issues of design management for atomic industry towns forbidden for Westerns are given consideration in the publication. Forbidden town city planning for atomic industry fall out of the state-controlled planning system. For the purpose of departmental planning special design specifications and design solutions were practiced.

**Key words:** VNIEP, town (city) — planning, GSPI № 11, forbidden city (town) for Westerns, Krasnoyarsk-26, Lengiprostroy, Tomsk-7, Chelyabinsk-40.

#### REFERENCES

1. Vlasov, A.I. Town planning for atomic industry. 1946–1968 [Text] / A.I. Vlasov, V.N. Ivanov, I.B. Orlov // Arch. GI VNIPIET F 1. Op. 1. Storage un. 1588. 104 p.
2. Novoselov, V.N. Development of atomic industry in Ural region [Text] : dis. ... doctor of historical sciences / V.N. Novoselov. — Chelyabinsk, 1999. — 506 p.
3. Yamaletdinov, S.F. Design management in Zheleznogorsk town, Krasnoyarsk territory [Text] / S.F. Yamaletdinov // City: past, present, future: proceeding of research-to-practice conference. — Irkutsk: Irkutsk State Technical University, 1998. — P. 175–177.

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 69.04

А.П. ЛОКТИОНОВ

### ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОМ МЕТОДЕ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ КОНСТРУКТИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

На основе полиномиальной аппроксимации в численном дифференцировании исследовано определение опорных моментов конструктивного элемента по прогибам или углам наклона упругой линии вне опорных сечений.

Ключевые слова: поперечный изгиб, краевая двухточечная задача, численное дифференцирование, аппроксимация, погрешность.

При обследовании сооружений в задаче оценки состояния отдельных конструктивных элементов — пролетов статически неопределеных балок и ригелей рам — рассматривают работу элемента с пробной нагрузкой, например, измеряют углы наклона упругой линии в опорных сечениях, решением обратной задачи строительной механики по данным о перемещениях вычисляют исходные данные расчетной схемы, уточняют граничные условия [1, 2].

Одна из проблем уточнения исходного расчета — учет особенностей не совсем жесткой заделки, допускающей некоторую податливость, либо шарнирной опоры с элементами защемления, учет упругих обмятий в соединениях элементов<sup>1</sup>.

В данной работе предлагается подход к решению преобразовательно-вычислительной задачи определения опорных моментов конструктивного элемента построением схемы пробных испытаний с размещением двух датчиков вне зон опорных сечений, что позволяет исключить влияние параметров силоведения и силораспределения, обмятий исследуемого элемента у его опор.

Предлагаемый подход учитывает использование двух датчиков угла наклона упругой линии или двух датчиков прогиба, позволяет дать сравнительную оценку влияния погрешности датчиков на погрешность схемы пробных испытаний в вариантах, отличающихся видом пробной нагрузки и датчиков, а также размещением датчиков.

**1. Краевая двухточечная задача с дифференциальным уравнением с кусочно-непрерывной неоднородностью.** Построенная математическая модель поперечного изгиба двухопорной балки с постоянной жесткостью на изгиб  $EI$ , нагруженной известной пробной нагрузкой, описывает краевую двухточечную задачу с дифференциальным уравнением

$$y''(x) = \xi_2 + \xi_3 x + y''_N(x)$$

<sup>1</sup> Лужин О.В., Злочевский А.Б., Горбунов И.А., Волохов В.А. Обследование и испытание сооружений. / Под ред. О.В. Лужина. М.: Стройиздат, 1987. 263 с.

с кусочно-непрерывной неоднородностью — внешней нагрузкой  $y''_N(x)$ , определяемой пробной нагрузкой, и краевыми условиями

$$\begin{aligned} y(0) &= \xi_0 = 0, \quad y(l) = 0, \quad y'(0) = \xi_1, \quad y''(0) = \xi_2 = M_0/EI, \\ y''(l) &= M_l/EI, \quad y'''(0) = \xi_3 = Q_0/EI, \end{aligned} \quad (1)$$

где числа  $\xi_0, \xi_1, \xi_2$  и  $\xi_3$  — начальные данные решения;

$M_0$  и  $M_l$  — неизвестные опорные моменты;

$Q$  — перерезывающая сила;

$l$  — длина балки — известный параметр модели.

Подстрочные индексы 0 и  $l$  указывают на отношение соответственно к концу 0 и концу  $l$  балки.

Данная задача при применении метода начальных параметров имеет частные решения

$$y(x) = P_3(x) + y_N(x), \quad (2)$$

где  $P_3(x)$  — алгебраический многочлен третьей степени

$$P_3(x) = \sum_{i=1}^3 \xi_i x^i / i,$$

включающие решение

$$\begin{aligned} y_N(x) &= \sum \Delta_{2i} U_+(x_{ai}) \frac{(x - x_{ai})^2}{2} + \\ &+ \sum \Delta_{3i} U_+(x_{bi}) \frac{(x - x_{bi})^3}{6} + \frac{1}{EI} \int_0^x q(s) \frac{(x - s)^3}{6} ds, \end{aligned} \quad (3)$$

такое, что  $y_N = 0, y'_N = 0, \dots, y^{n-1}_N = 0$  при  $x \leq 0$ , и имеющее вид нормальной реакции на внешнюю нагрузку  $y''_N(x)$ .

В уравнении (3):

$\Delta_{2i} = M_i/EI$  — скачок второй производной  $y(x)$  в сечении  $x = x_{ai}$ ;

$\Delta_{3i} = P_i/EI$  — скачок третьей производной  $y(x)$  в сечении  $x = x_{bi}$ ;

$q(x)$  — интенсивность распределенной нагрузки;

$P$  — внешняя поперечная сила, нагружающая балку.

Функция  $y_N(x)$  содержит члены вида  $\Delta_i U_+(x_i)$ , где  $U_+(x_i)$  — единичная разрывная функция, определенная как

$$U_+(x_i) = \begin{cases} 0 & \text{при } x \leq x_i, \\ 1 & \text{при } x > x_i. \end{cases}$$

Эта обобщенная функция не имеет самостоятельного значения в том смысле, что она, в частности, не подлежит интегрированию и дифференцированию.

*Замечание 1.* Задача вычисления значения начального данного  $\xi_2$  по измеренным значениям прогибов  $y^*(x_i)$  и (или) углов  $y'^*(x_i)$  наклона упругой линии является обратной задачей — задачей численного дифференцирования.

*Замечание 2.* Рассматривается симметричная схема испытаний ( $0 \leq x_1 < l/2 < x_2 = l - x_1$ ).

*Замечание 3.* При размещении датчиков вне зон опорных сечений выполняются ограничения — условия принципа Сен-Венана, например, ограничения  $h \leq x_1 < x_2 \leq l - h$  ( $h$  — высота поперечного сечения балки) [3].

Используем классы преобразования отсчетов  $y^*(x_i)$  и  $y'^*(x_i)$  — линейные преобразования, проходящие через начало координат, с одинаковой приведенной погрешностью  $\varepsilon_p$  отсчетов во всех отсчетных точках  $x_i$  и одинаковым пределом измерений  $y_p$ , равным верхней границе  $\sup|y^*(x_i)|$  на компактном наборе вещественных чисел  $\{y^*(x_1), y^*(x_2)\}$  [4], или одинаковым пределом измерений  $\beta_p$ , равным верхней границе  $\sup|y'^*(x_i)|$  на компактном наборе вещественных чисел  $\{y'^*(x_1), y'^*(x_2)\}$ . На этих классах выполняется равномерная непрерывная норма абсолютной погрешности отсчетов и соотношения

$$\|\Delta(y(x_i))\| = \Delta_m y(x_i) = \varepsilon_p y_p \geq \Delta(y(x_i)), \quad (4)$$

$$\|\Delta(y'(x_i))\| = \Delta_m y'(x_i) = \varepsilon_p \beta_p \geq \Delta(y'(x_i)), \quad (5)$$

где  $\Delta_m y(x_i)$  и  $\Delta_m y'(x_i)$  — верхние границы абсолютных значений погрешности отсчетов,

$$\Delta(y(x_i)) = |y^*(x_i) - y(x_i)|, \quad \Delta(y'(x_i)) = |y'^*(x_i) - y'(x_i)|.$$

Сопоставляем погрешность результатов решения вариантов преобразовательно-вычислительной задачи количественной мерой степени обусловленности задачи — относительным числом обусловленности.

**Определение 1.** Относительным числом обусловленности  $v$  преобразовательно-вычислительной задачи в соотношении

$$\delta_m(\xi_2) \leq v \varepsilon_p \quad (6)$$

называется коэффициент возможного возрастания уровня относительного значения погрешности  $\delta(\xi_2)$  искомого результата задачи по отношению к вызвавшим ее относительным значениям погрешности  $\delta y(x_i)$  или  $\delta y'(x_i)$  входных данных — отсчетов  $y^*(x_i)$  или  $y'^*(x_i)$  [4].

**2. Моделирование связи внешней нагрузки и условий опищения конструктивного элемента с результатом решения двухточечной краевой задачи.** Учитывая, что величина начального данного  $\xi_2$  при изгибе двухпорной балки с внешней нагрузкой  $y''_N(x)$  максимальна при жесткой заделке, а может быть и равной нулю (при свободном опирании), используем в дальнейших расчетах относительной погрешности среднее значение  $\xi_{2cp}$  начального данного  $\xi_2$ , равное половине значения при жесткой заделке.

Принимаем  $y_p = y(x_1)$  и  $\beta_p = y'(x_1)$ , вводим коэффициенты связи

$$K_{y\xi} = y_{cp}(x_1)/l^2 \xi_{2cp}, \quad (7)$$

$$K_{\beta\xi} = y'_{cp}(x_1)/l \xi_{2cp}. \quad (8)$$

При внешней нагрузке поперечной силой  $P$

$$y''_N(x)_p = \Delta_3(x - l/2) U_+(l/2)$$

частное решение (3) имеет вид

$$y_N(x_i)_p = (\Delta_3/6)(x_i - l/2)^3 U_+(l/2),$$

следовательно,

$$y_N(x_l)_p = \Delta_3 l^3 / 48,$$

$$y'_N(x_i)_p = (\Delta_3/2)(x_i - l/2)^2 U_+(l/2), \quad y'_N(x_l)_p = \Delta_3 l^2 / 8.$$

Принимаем  $\alpha_1 = x_1/l$ . Учитывая предельные случаи — жесткую заделку и свободное опирание, получаем средние значения коэффициентов связи

$$K_{y\xi p} = \alpha_1(3 + 3\alpha_1 - 8\alpha_1^2)/6, \quad K_{\beta\xi p} = (1 + 2\alpha_1 - 8\alpha_1^2)/2. \quad (9)$$

При внешней распределенной нагрузке постоянной интенсивности  $q$  на интервале  $[a, b]$

$$y''_N(x)_q = qx^2/2EI,$$

частное решение (3) имеет вид

$$y_N(x)_q = qx^4/24EI,$$

следовательно,

$$y_N(x_l)_q = ql^4/24EI, \quad y'_N(x_i)_q = qx_i^3/6EI.$$

Учитывая предельные случаи: жесткую заделку и свободное опирание, получаем для нагрузки  $q$  формулы коэффициентов связи

$$K_{y\xi q} = \alpha_1(1 - \alpha_1)(1 + 2\alpha_1 - 2\alpha_1^2)/2, \quad K_{\beta\xi q} = (1 - 2\alpha_1)(1 + 4\alpha_1 - 4\alpha_1^2)/2. \quad (10)$$

**3. Модель схемы испытаний с датчиками прогиба.** Используем в решении задачи численного дифференцирования для получения второй производной прогиба лагранжеву аппроксимацию<sup>2</sup>, которую в данной работе модифицируем на случай неизвестных  $\xi_1$ ,  $\xi_2$  и  $\xi_3$  (при  $\xi_0 = 0$ ). Искомое начальное данное  $\xi_2$  определяем с помощью трех лагранжевых коэффициентов  $L_i$  (по числу неизвестных)

$$\xi_2 = \sum_{i=1}^3 [L_i(y(x_i) - y_N(x_i))] / l^2. \quad (11)$$

Для того чтобы при использовании этого аппроксимационного многочлена исключить влияние начальных данных  $\xi_1$  и  $\xi_3$ , необходимо выполнить условия:

$$\sum_{i=1}^3 L_i \alpha_i = 0, \quad \sum_{i=1}^3 L_i \alpha_i^2 = 2, \quad \sum_{i=1}^3 L_i \alpha_i^3 = 0. \quad (12)$$

Здесь и далее  $\alpha_i = x_i/l$  — относительные координаты точек отсчетов.

Условиям (12) удовлетворяют значения лагранжевых коэффициентов

$$L_1 = -2 \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{\alpha_1(\alpha_2 - \alpha_1)(\alpha_3 - \alpha_1)}, \\ L_2 = 2 \frac{\alpha_1 + \alpha_3}{\alpha_2(\alpha_2 - \alpha_1)(\alpha_3 - \alpha_2)}, \quad L_3 = -2 \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{\alpha_3(\alpha_3 - \alpha_1)(\alpha_3 - \alpha_2)}. \quad (13)$$

Для приведения рассматриваемой задачи к двухточечной краевой задаче дополнительно к условиям (1) принимаем  $\alpha_3 = 1$ , вводим коэффициент  $L_l$ , равный коэффициенту  $L_3$ , по частным решениям (2) и аппроксимационной формуле (11) получаем формулу определения искомого краевого условия

---

<sup>2</sup> Локтионов А.П. Принцип построения системы управления исследованиями и испытаниями механических конструкций на основе редукции преобразований // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2010. № 6. С. 57–61.

$$\xi_2 = -\frac{1}{l^2} L_l y_N(x_l) + \frac{1}{l^2} \sum_{i=1}^2 [L_i(y(x_i) - y_N(x_i))]. \quad (14)$$

Для последней формулы с учетом замечания 2 лагранжевы коэффициенты (13) преобразуем к виду:

$$L_1 = -\frac{2(\alpha_2 + 1)}{\alpha_1 \alpha_2 (\alpha_2 - \alpha_1)}, \quad L_2 = \frac{2(\alpha_1 + 1)}{\alpha_1 \alpha_2 (\alpha_2 - \alpha_1)}, \quad L_l = -\frac{2}{\alpha_1 \alpha_2}. \quad (15)$$

Приближенное по выражению (14) решение

$$\xi_2^* = -\frac{1}{l^2} L_l y_N(x_l) + \frac{1}{l^2} \sum_{i=1}^2 L_i (y^*(x_i) - y_N(x_i))$$

отвечает возмущенным исходным данным — отсчетам  $y^*(x_1)$  и  $y^*(x_2)$ , уровню ошибок исходных данных в пределах неопределенности каждого отсчета.

Суммарная абсолютная погрешность по двум отсчетным точкам

$$\Delta \xi_2 = \sum_{i=1}^2 [L_i \Delta(y(x_i))] / l^2.$$

Относительная погрешность определения величины  $\xi_2$

$$\delta \xi_2 = \frac{1}{l^2 |\xi_2|} \sum_{i=1}^2 L_i \Delta(y(x_i)). \quad (16)$$

Подставляем соотношения (4) и (7) в формулу (16), получаем выражение для верхней границы относительной погрешности

$$\delta_m(\xi_2) = \varepsilon_p K_{y\xi} \sum_{i=1}^2 |L_i|.$$

С учетом значений лагранжевых коэффициентов (15) преобразуем последнюю формулу к виду

$$\delta_m(\xi_2) = \frac{6\varepsilon_p K_{y\xi}}{\alpha_1(1-\alpha_1)(1-2\alpha_1)}.$$

Далее с учетом соотношения (6) получаем формулу вычисления относительного числа обусловленности преобразовательно-вычислительной задачи при отсчетах прогибов

$$v_y = \frac{6K_{y\xi}}{\alpha_1(1-\alpha_1)(1-2\alpha_1)}.$$

Подставляем выражения коэффициентов связи  $K_{y\xi p}$  из (9) и  $K_{y\xi q}$  из (10) в последнюю формулу, получаем числа обусловленности задачи при внешней нагрузке силой  $P$  и распределенной нагрузке интенсивностью  $q$  при измерении прогибов

$$v_{py} = 3 \frac{1+\alpha_1 - 8\alpha_1^2/3}{(1-\alpha_1)(1-2\alpha_1)}, \quad v_{qy} = 3 \frac{1+2\alpha_1 - 2\alpha_1^2}{1-2\alpha_1}.$$

Значения чисел обусловленности  $v_{py}$  и  $v_{qy}$  при  $\alpha_1 \leq 0,1$  менее 4,5 и незначительно отличаются между собой, стремятся к трем при  $\alpha_1 \rightarrow 0$  (рис. 1).

**4. Модель схемы испытаний с датчиками угла наклона упругой линии.** Используем в решении данной задачи численного дифферен-

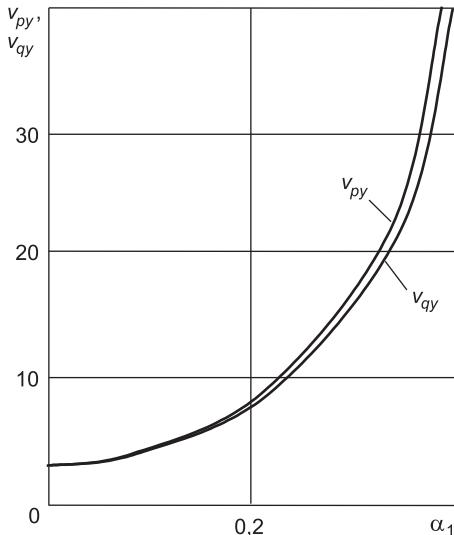


Рис. 1. Влияние координаты первого отсчета прогиба на число обусловленности

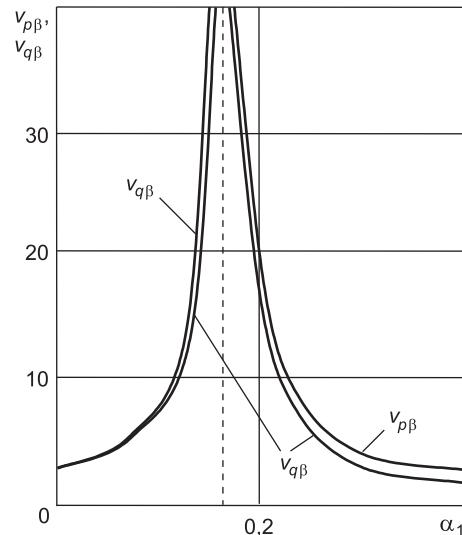


Рис. 2. Влияние координаты первого отсчета угла наклона упругой линии на число обусловленности

цирования для получения второй производной прогиба через углы наклона упругой линии балочного конструктивного элемента эрмитову аппроксимацию с помощью трех эрмитовых коэффициентов  $C_1$ ,  $C_2$  и  $H_3$  (по числу неизвестных)

$$\xi_2 = \sum_{i=1}^2 [C_i(y'(x_i) - y'_N(x_i))] / l + H_3(y(x_3) - y_N y(x_3)) / l^2. \quad (17)$$

Для приведения рассматриваемой задачи к двухточечной краевой задаче дополнительно к условиям (1) принимаем  $\alpha_3 = 1$ , вводим коэффициент  $H_l$ , равный коэффициенту  $H_3$ , по частным решениям (2) и аппроксимационной формуле (17) получаем формулу определения искомого краевого условия

$$\xi_2 = -H_l y_N(x_l) / l^2 + \sum_{i=1}^2 [C_i(y'(x_i) - y'_N(x_i))] / l. \quad (18)$$

В последней формуле с учетом замечания 2 эрмитовы коэффициенты имеют вид:

$$C_1 = -2 \frac{3\alpha_2 - 1}{(\alpha_2 - \alpha_1)(1 - 6\alpha_2\alpha_1)}, \quad (19)$$

$$C_2 = -2 \frac{1 - 3\alpha_1^2}{(\alpha_2 - \alpha_1)(1 - 6\alpha_1\alpha_2)}, \quad H_l = \frac{6}{1 - 6\alpha_1\alpha_2}.$$

Относительная погрешность определения величины  $\xi_2$

$$\delta\xi_2 = \frac{1}{l|\xi_2|} \sum_{i=1}^2 |C_i \Delta(y(x_i))|.$$

Подставляем соотношения (5) и (8) в последнюю формулу, получаем выражение для верхней границы относительной погрешности

$$\delta_m(\xi_2) = \varepsilon_p K_{\beta\xi} \sum_{i=1}^2 |C_i|. \quad (20)$$

С учетом выражений эрмитовых коэффициентов (19), коэффициентов связи  $K_{\beta\xi p}$  из (9),  $K_{\beta\xi q}$  из (10) и формулы (20), соотношения (6) получаем числа обусловленности задачи при внешней нагрузке силой  $P$  и распределенной нагрузке интенсивностью  $q$  при измерении углов наклона упругой линии балки

$$v_{p\beta} = \frac{(|3\alpha_2^2 - 1| + 1 - 3\alpha_1^2)(1 + 2\alpha_1 - 8\alpha_1^2)}{(\alpha_2 - \alpha_1)|1 - 6\alpha_2\alpha_1|},$$

$$v_{q\beta} = \frac{(|3\alpha_2^2 - 1| + 1 - 3\alpha_1^2)(1 + 4\alpha_1 - 4\alpha_1^2)}{|1 - 6\alpha_2\alpha_1|}.$$

Значения чисел обусловленности  $v_{p\beta}$  и  $v_{q\beta}$  при  $\alpha_1 \leq 0,1$  не превосходят 7,3, незначительно отличаются между собой, стремятся к трем при  $\alpha_1 \rightarrow 0$  (рис. 2). На рис. 2 пунктирная прямая  $\alpha_1 = (1 - 1/\sqrt{3})/2 \approx 0,211$  — асимптота линий чисел обусловленности. Графики на рис. 2 характеризуют неопределенность преобразования опорного момента  $M_0$  при  $\alpha_1 \approx 0,211$ .

При выполнении замечания 4, в частности при  $h \leq 0,1l$ , сравнение графиков рис. 1 и 2 указывает на преимущество измерения прогибов в сравнении с измерением углов наклона упругой линии — числа обусловленности соответственно менее 4,5 и 7,3.

**Замечание 4.** Использование функций (14) и (18) с переменой направления оси  $Ox$  на противоположное, сменой местами точек  $x = 0$  и  $x = l$ , заменой последовательности значений узлов аппроксимационной сетки  $\alpha_1, \alpha_2$  на обратную последовательность, заменой последовательности значений лагранжевых или эрмитовых коэффициентов на обратную последовательность, результаты, связанные с определением второй производной  $y''(0) = \xi_2$  и сопутствующих чисел обусловленности, распространяются на определение второй производной  $y''(l)$ .

**Вывод.** Получены решения задачи оценки состояния балочного конструктивного элемента в разработанном подходе учета вида внешней нагрузки с использованием полиномиальной аппроксимации с равномерной непрерывной нормой.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Казачек, В.Г. Обследование и испытание зданий и сооружений [Текст] / В.Г. Казачек, Н.В. Нечаев, С.Н. Нотенко и др. ; под ред. В.И. Римшина. — М. : Высш. шк., 2007. — 655 с.
- Землянский, А.А. Обследование и испытание зданий и сооружений [Текст] / А.А. Землянский. — М. : Изд-во АСВ, 2002. — 240 с.
- Локтионов, А.П. Концепция модели исследования внутренних силовых факторов в элементах конструкций измерительными ячейками [Текст] / А.П. Локтионов // Изв. вузов. Строительство. — 2005. — № 6. — С. 88–93.
- Локтионов, А.П. Структурная регуляризация подсистемы преобразовательного компонента преобразовательно-вычислительных систем [Текст] / А.П. Локтионов. — Курск : Курск. гос. техн. ун-т, 2009. — 323 с.

*ЛОКТИОНОВ Аскольд Петрович, канд. техн. наук, доц. Юго-Западный государственный университет, г. Курск*

Получено 18.10.11

**Loktionov Askold Petrovich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Southwest State University, Kursk, Russia

## **POLINOMIAL APPROXIMATION IN THE METHOD OF EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL ESTIMATION OF THE CONSTRUCTION ELEMENT STATE**

On the basis of polynomial approximation in numerical differentiation there was studied determination of the construction element's support moments by deflection and slope of elastic line excluding support sections.

**Key words:** cross bending, boundary two-point problem, numerical differentiation, approximation, error.

### REFERENCES

1. Kazachek, V.G. Inspection and Testing of Buildings and Structures [Text] / V.G. Kazachek, N.V. Nechayev, S.N. Notenko et al.; ed. by V.I. Rimshin. — M.: Higher school, 2007. — 655 p.
  2. Zemlyansky, A.A. Inspection and Testing of Buildings and Structures [Text] / A.A. Zemlyansky. — M.: ASV, 2002. — 240 p.
  3. Loktionov, A.P. Search model conception of internal load-bearing factors in structural elements by measuring cells [Text] / A.P. Loktionov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2005. — N 6. — P. 88–93.
  4. Loktionov, A.P. Structural Regularization of a Transforming Component Subsystem of Transforming and Computational Systems [Text] / A.P. Loktionov. — Kursk: Kursk State Technical University, 2009. — 323 p.
-

УДК 691.327:620.193.001.4

Ш.М. РАХИМБАЕВ, Н.М. ТОЛЫПИНА, А.А. БАЛЕС

**ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ  
УСКОРЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ  
НА ВНУТРЕННЮЮ КОРРОЗИЮ**

Исследовано влияние различных факторов на кинетику реакций между щелочами и реакционноспособным кремнеземом заполнителя бетона при помощи кольца Ле Шателье. Установлено, что кинетика коррозии расширения зависит от условий хранения образцов, концентрации щелочи и способа ее поступления в бетон. Рекомендуется проводить испытания в условиях, близких к реальным.

Ключевые слова: кольцо Ле Шателье, коррозия, кремнезем, щелочи.

Установлено, что наиболее надежным способом определения реакций щелочей цемента с кремнеземом заполнителя являются прямые испытания заполнителей в бетоне. Испытания делятся в течение 1 года, образцы-балочки размером  $70 \times 70 \times 280$  мм определенного состава хранятся над водой при температуре  $38 \pm 1$  °С. Количество щелочей в цементе должно составлять 1,5 % (ГОСТ 8269.0–97).

Длительность таких испытаний не позволяет быстро оценивать пригодность заполнителей, в связи с чем применяются ускоренные методы испытаний. Их проводят на образцах-балочках размером  $25 \times 25 \times 254$  мм, изготовленных из мелкозернистого бетона состава 1:2,25, которые хранятся в 1 М растворе гидроксида натрия при температуре  $80 \pm 1$  °С (ГОСТ 8269.0–97). Такой прием позволяет сократить испытания до 1 мес. Однако, как отмечено специалистами, наблюдается несоответствие результатов, полученных по длительной и ускоренной методикам, что обусловлено различием механизмов развития коррозии в зависимости от внешних условий [1].

Авторами проведены исследования по выбору оптимальных условий для ускорения щелочной коррозии по разработанной методике [2]. Для проведения экспериментов использовали ЦЕМ I 42,5 Н (ЗАО «Белгородский цемент») с содержанием щелочей 0,55 %, дробленый природный перлит Мухор-Талинского месторождения (фракция 0,63–1,25 мм). Наличие реакционноспособного кремнезема в перлите составляет 134 ммоль/л [3].

Смесь мелкозернистого бетона либо затворялась 3 %-ным раствором NaOH, либо затвердевшие образцы из нее помещались в 1 М раствор NaOH при комнатной температуре. Результаты представлены на рис. 1.

Испытания показали, что максимальное расхождение между стержнями кольца Ле Шателье наблюдалось при затворении 3 %-ным раствором гидроксида натрия и погружении колец в воду. Если образцы мелкозернистого бетона помещали в 1 М раствор гидроксида натрия, процессы коррозии развивались медленно, что затрудняет идентификацию щелочной коррозии. Повышение температуры раствора щелочи ускоряет коррозию, но вызывает нехарактерный для реальных условий механизм ее раз-

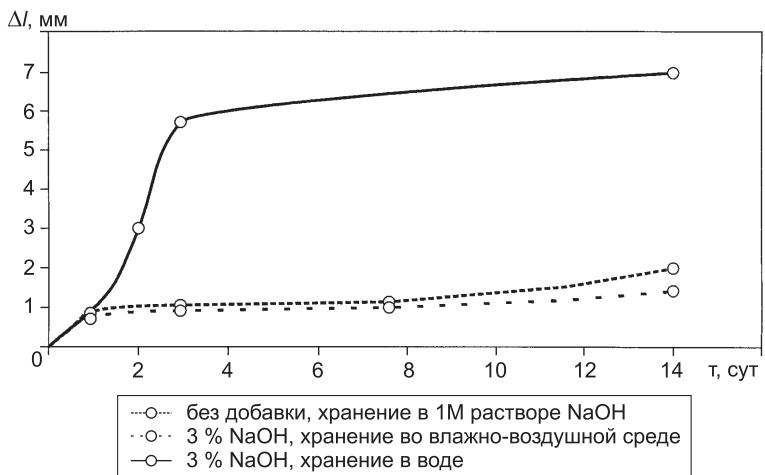


Рис. 1. Влияние влажности и состава среды хранения на кинетику щелочной коррозии

вития и, как следствие, обусловливает получение неадекватных результатов. Поэтому введение гидроксида натрия с водой затворения является наиболее эффективным приемом ускорения коррозии.

Испытания колец Ле Шателье из мелкозернистого бетона в воде и в воздушно-влажных условиях на реакционноспособном заполнителе, затворенных щелочами, показали, что результаты существенно различаются (рис. 2).

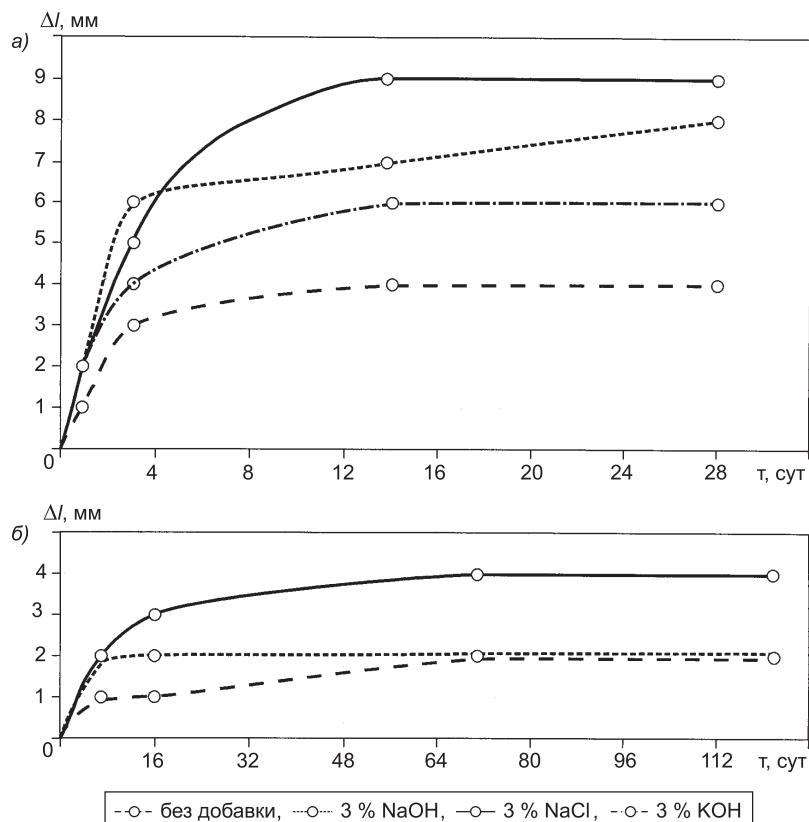


Рис. 2. Влияние влажности среды на щелочную коррозию

а — твердение в воде; б — твердение во влажно-воздушных условиях

При погружении колец в воду наблюдается наибольшее расширение образцов, что позволяет более эффективно идентифицировать наличие кремнезем-щелочных реакций. Но при твердении в воде возможно наблюдение образцов за счет поглощения воды, растворение и вынос щелочей, что может исказить показатели внутренней коррозии.

В стандартных методиках, разработанных в РФ и РИЛЕМ, рекомендуется растворные образцы с повышенным содержанием щелочи выдерживать в воздушно-влажных условиях, во избежание выщелачивания в воде. Но в таких условиях идет замедленное расширение бетона, в результате коррозия диагностируется хуже.

Для проведения длительных испытаний (1 год) по ГОСТ 8269.0–97 рекомендуется добавлять в цемент до 1,5 % щелочи. Для ускорения внутренней коррозии в нормальных условиях содержание щелочей должно быть таким, чтобы можно было идентифицировать коррозию, но не исказить процессы, аналогичные реальным. Влияние содержания щелочей на расширение образцов бетона показано на рис. 3.

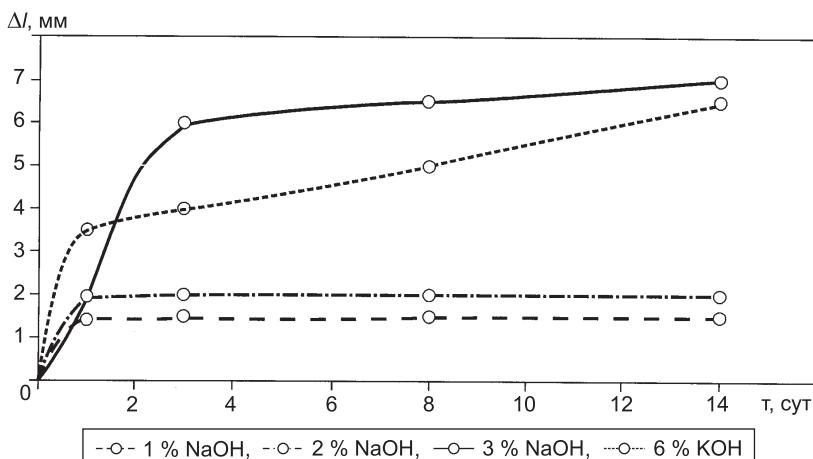


Рис. 3. Влияние концентрации щелочи на кинетику расширения колец  
Ле Шателье

При введении 1 и 2 % щелочи от массы цемента в смесь с реакционноспособным заполнителем расширение бетона в кольце было незначительным. Применение 3 % щелочи от массы цемента значительно увеличивает деформации расширения через 2 недели испытаний. Дальнейшее повышение расхода щелочи до 6 % мало влияет на расширение бетона по сравнению с 3%-ной дозировкой. Это хорошо согласуется с реальными условиями возможного максимального поступления щелочей с вводимыми добавками и из внешней среды при эксплуатации.

Проведенные исследования позволяют повысить адекватность результатов ускоренных испытаний щелочной коррозии реальным условиям эксплуатации изделий. Испытания можно ускорить до 7–10 сут, используя хорошо апробированные технологии экстраполяции краткосрочных испытаний цементных систем на основе теории переноса [4].

**Выводы.** Приведенные данные показывают, что кинетика коррозии зависит от условий хранения образцов. Поэтому, если известна среда эксплуатации материала, то испытания на щелочную коррозию необходимо проводить в аналогичных условиях. При эксплуатации материала в воздушно-влажностных условиях испытания образцов рекомендуется проводить в эксикаторе над водой. Если материал будет эксплуатиро-

ваться в водной среде, то образцы следует хранить в воде. В случаях, когда условия эксплуатации неизвестны, испытания рекомендуется проводить по более жесткому варианту — в водной среде.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брыков, А.С. Щелоче-силикатные реакции и коррозия бетона [Текст] / А.С. Брыков // Цемент и его применение. — 2009. — № 5. — С. 31–37.
2. Рахимбаев, Ш.М. Способ определения реакций между щелочами и заполнителем [Текст] / Ш.М. Рахимбаев, Н.М. Толыпина // Вестн. БГТУ. — 2011. — № 2. — С. 79–81.
3. Иванов, Ф.М. Взаимодействие заполнителей бетона с щелочами цемента и добавок [Текст] / Ф.М. Иванов, Г.В. Любарская и др. // Бетон и железобетон. — 1995. — № 1. — С. 15–18.
4. Рахимбаев, Ш.М. Расчет кинетики процессов переноса в технологии строительных материалов: метод указания [Текст] / Ш.М. Рахимбаев, Е.А. Пospelova. — 2-е изд., стер. — Белгород : Изд-во БелГТАСМ, 2001. — 55 с.

*РАХИМБАЕВ Шарк Матрасулович, д-р техн. наук, проф.*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
ТОЛЫПИНА Наталья Максимовна, канд. техн. наук, доц.*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
БАЛЕС Анна Александровна, инж.*

*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

Получено 02.10.11

**Rahimbaev Shark Matrasulovich**, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Tolypina Natalya Maksimovna**, candidate of technical sciences, assistant professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Bales Anna Aleksandrovna**, engineer, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

#### OPTIMUM CONDITIONS OF THE ACCELERATED TESTS FOR INTERNAL CORROSION

Influence of various factors on acceleration of reactions between alkalis and reactive silica material of construction aggregate by means of a ring Le Shatele. It is established that kinetics expansion corrosion depends on storage conditions of samples, concentration of alkali and a way of its receipt in concrete. It is recommended to conduct trials in the conditions of close to the real.

**Key words:** ring of Le Shatele, corrosion, silicon dioxide, alkalis.

#### REFERENCES

1. Brykov, A.S. Alkali-silica reaction and concrete corrosion [Text] / A.S. Brykov // Cement and its applications. — 2009. — N 5. — P. 31–37.
2. Rahimbaev, Sh.M. Way of definition of reactions between alkalis and aggregate [Text] / Sh. M. Rahimbaev, N.M. Tolypina // Vestnik BSTU. — 2011. — N 2. — С. 79–81.
3. Ivanov, F. M. Interaction of concrete aggregate with alkalis of Cement and Additives [Text] / F.M. Ivanov, G.V. Lyubarskaya etc. // Concrete and ferro-concrete. — 1995. — N 1. — P. 15–18.
4. Rahimbaev, Sh.M. Calculation of Kinetics Processes of Carrying over to Technologies of Building Materials: Methodical Instructions [Text] / Sh.M. Rahimbaev, E.A. Pospelova. — Belgorod : BelGTASM, 2001. — 55 p.

УДК 624.042.5

Н.Н. ПАНТЕЛЕЕВ, Д.А. БЕЗГЕММЕР

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗДАНИЙ ПРИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Известно, что здания-сооружения испытывают сложное напряженное состояние под влиянием температурных перепадов в конструкциях при нагреве и остывании конструкций в процессе возведения и эксплуатации. В настоящей статье рассматривается напряженно-деформированное состояние цилиндрических зданий кругового очертания в плане, с примером расчета на температурные климатические воздействия.

**Ключевые слова:** теплопроводность, интеграл, суперпозиция, уравнение, плотность, теплоемкость, пластичность, радиус, параметры, аргумент, жесткость, напряжение, деформация.

Основные теоретические предпосылки решения термоупругопластической задачи составной цилиндрической многоярусной системы здания-сооружения и решения этой задачи подробно освещены автором статьи в монографии [1], пособии [2] и многочисленных публикациях.

Следуя гипотезе макрофизической определимости А.А. Ильюшина<sup>1, 2</sup>, одним из авторов сформулирован М-образец, соответствующий определенной области monoструктуры и являющийся ее частью. В отличие от М-образца сплошного тела, находящегося под воздействием внешних объемных и поверхностных сил, для составной системы в температурном поле размеры М-образца здесь представляются в виде круглого упругопластического диска, когда начальную температуру его можно измерить. В [3] дается методика приведения М-образца как реального упругопластического тела к двум упругим сплошным телам. Для М-образца (обичайки) в предложенной системе выполняются все необходимые положения существования М-образца как твердого деформированного тела: область, занимаемая М-образцом (ярус), кратна области тела системы; поверхности М-образцов системы, примыкающие друг к другу, обладают признаками наложимости; М-образец характеризуется как упругопластическое тело; предельное состояние М-образца формируется в соответствии с принципом механики твердого деформируемого тела; полная деформация М-образца состоит из упругой ( $\varepsilon_y^1$ ) и пластической ( $\varepsilon_y^{(p)}$ ); М-образец из деформированного состояния простой разгрузкой (остывание образца) можно привести в состояние ( $\sigma_y = 0, \varepsilon_y = 0$ ), которое рассматривается как новое состояние тела. Сформулированные свойства являются предопределяющими для построения модели всей системы [2]. Таким образом, обобщенная физическая модель системы трактуется в виде составного цилиндрического кусочно-однородного тела из М-образцов, находя-

<sup>1</sup> Ионов В.Н., Огibalov П.М. Прочность пространственных элементов конструкций. М.: Высш. шк., 1972. 752 с.

<sup>2</sup> Ильюшин А.А. Метод СН-ЭВМ в теории пластичности // Проблемы прикладной математики и механики. М.: Наука, 1971. С. 166–178.

щихся в термодинамическом взаимодействии в контакте с упругопластическими средами (ярусами). Принимается также, что радиальные деформации бетона и арматуры на контуре равны (удлинение бетона и стали при  $t \leq 200$  °C).

Для решения контактной задачи в каждом конкретном случае, вследствие достаточной сложности задачи, требуется свой подход и следует искать упрощения. Например, в [2, с. 33] условие связи на плоскости контакта стенок и диафрагмы (перекрытий) составного условного стержня записано так:

$$q_{X3} = u G_{X3},$$

где  $q_{X3}$  — распределенное сдвигающее усилие ( $\tau$ );

$G_{X3}$  — коэффициент жесткости в узле связи диафрагмы и стенки в направлении координаты  $X_3$  [1, с. 102];

$u$  — функция перемещений.

Используя зависимость перемещения  $u$  сил сдвига  $q_{X3} = F(X_3, \xi, t)$  и напряжения  $\epsilon_{X3} - \alpha_t T = \frac{1}{E} \cdot \sigma_{X3}$ , получим дифференциальное уравнение термоупругости [2, с. 34]

$$\frac{dq_{X3}}{dX_3} \cdot \frac{1}{G_{X3}} - \alpha_t T = \frac{1 \cdot q_{X3}}{E_6 \delta_{ct} S},$$

где  $\alpha_t$  — коэффициент линейного расширения (бетон);

$E_6$  — модуль деформации железобетона;

$S$  — длина окружности серединной оси стенки цилиндра;

$\delta_{ct}$  — толщина стенки цилиндра;

$T(X_3, \xi, t)$  — функция температур — температура в стенке цилиндрической оболочки (в общем виде, полученной от функции источника  $Q_t^i$ ,  $\xi$  — координата приложения источника).

В [2, с. 36] получено значение  $q_{X3}(X_3, \xi, t)$  как полное на единицу длины образующей цилиндра при интегрировании дифференциального уравнения.

В работе Н.Н. Пантелеева<sup>3</sup> применена теорема взаимности в термоупругости и после некоторых преобразований для 2-го тела суперпозиции (см. ниже) получена формула температурной функции в любой области 2-го тела [2, с. 46]

$$T_{2r} = T_{0r} (1 + \exp^{F_{\sigma2}}),$$

где  $F_{\sigma2}$  — функция контактного взаимодействия слоев

$$F_{\sigma2} = (S_2) = \frac{4}{3} \cdot \frac{\omega_3 K_p}{\frac{C_g}{C_s} + \left(1 - \frac{2}{3} \omega_3\right)},$$

где  $T_{0r}$  — обобщенная температура в области  $G_r$ ;

$C_g, C_s$  — коэффициенты соответствия сопряженных элементов (стенка, диафрагмы);

$K$  — отношение плотностей 1-го и 2-го тел;

$\omega_3$  — коэффициент пластичности для бетона (далее  $\beta^2$ ).

<sup>3</sup> Пантелеев Н.Н. Континуализация каркасных систем зданий на температурные воздействия // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1984. № 9. С. 96 (формула (3.31)).

Для конкретного случая исследования термоупругопластичности железобетонного барабана здания Новосибирского государственного академического театра оперы и балета (НГАТОиБ), на основании комментируемого выше общего математического метода расчета цилиндрических систем зданий и сооружений на температурные климатические воздействия, с учетом некоторых упрощений (отсутствие дислокаций в швах соединения и сосредоточенных источников тепла) получено решение для напряжений в перекрытиях разомкнутого кольцевого сектора с целью оценки напряженного состояния существующих строительных конструкций этой значительной части здания театра.

В пособии [2, с. 24, рис. 2.4] сформулирована расчетная схема цилиндрического здания в виде суперпозиции двух систем с жесткими и упругопластическими связями (рис. 1).

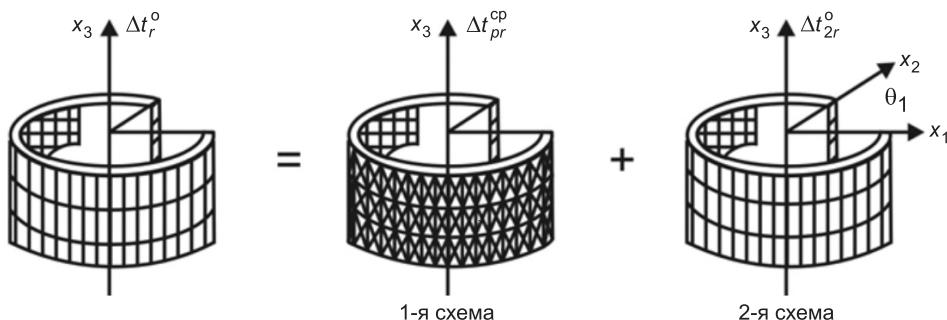


Рис. 1. Суперпозиция расчетной схемы разомкнутого цилиндра каркасной системы барабана здания НГАТОиБ

1-я схема — упругие напряжения при коэффициенте жесткости ярусов (среды), равном  $G_1 = \infty$ ; 2-я схема — с упругопластическими сдвигами (дислокациями) ярусов (среды)

Для цилиндрических координат запишем уравнение теплопроводности в любом уровне  $r$  для 2-й системы суперпозиции

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T_2}{\partial \Theta^2} = T_{02}^0 \beta^2 (1 + e^{F_{02}}), \quad (1)$$

где  $r$  — радиус кольца;  $\Theta$  — полярный угол.

Можно считать, что температура  $T_2$  по дуге кольца распределена равномерно, и в уравнении (1) функции не зависят от угла  $\Theta$ . Тогда уравнение (1) упростится:

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_2}{\partial r} = f_1, \quad (2)$$

где  $f_1 = T_{02}^0 \beta^2 (1 + e^{F_{02}})$ . Здесь  $F_{02}$  — функция контактного взаимодействия между слоями системы [4].

Решение уравнения (2) известно<sup>4</sup>. Здесь общее решение и, соответственно, частное

$$T_2 = C_1 \ln r + C_2 r^2 \ln r, \quad T_2 = Cr^2, \quad C = \frac{f_1}{4}. \quad (3)$$

Тогда полный интеграл получит выражение

$$T_2 = C_1 \ln r + C_2 r^2 \ln r + \frac{f_1 r^2}{4}. \quad (4)$$

<sup>4</sup> Жемочкин Б.Н. Теория упругости. М.: Госиздат по строительству и архитектуре, 1957. С. 30–32.

Здесь при  $r_2 = b$ ,  $r_1 = a$  на границе кольца примем  $T_2 = 0$  (см. рис. 1), можно записать из (3) два уравнения относительно постоянных  $C_1$ ,  $C_2$  и найти их. Используя (4) и найденные значения  $C_1$ ,  $C_2$ , получим для 2-й системы функции температуры  $T_2$ :

$$T_2 = -f_t \left\{ \ln r \left[ \frac{(\ln b - \ln a)a^2 b^2}{(b^2 - a^2) \ln a \ln b} \right] + \ln r \cdot r^2 \left[ \frac{a^2 \ln b - b^2 \ln a}{(a^2 - b^2) \ln a \ln b} \right] - \frac{r^2}{4} \right\} = -T_{02} K_{sr}, \quad (5)$$

где  $T_{02}$  — начальная температура во 2-й схеме;

$$K_{sr} = \left\{ \ln r \left[ \frac{(\ln b - \ln a)a^2 b^2}{(b^2 - a^2) \ln a \ln b} \right] + \ln r \cdot r^2 \left[ \frac{a^2 \ln b - b^2 \ln a}{(a^2 - b^2) \ln a \ln b} \right] - \frac{r^2}{4} \right\} \cdot \beta^2 (1 + e^{F_{\sigma 2}}),$$

где  $F_{\sigma 2}$  — функция контактного взаимодействия сред для 1-й и 2-й схемы, зависящая от плотности сред, функции пластичности  $\beta^2 (1/\text{м}^2)$ , удельной теплопроводности кольцевых перекрытий и их толщин, теплопроводности воздуха ( $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )<sup>5</sup>.

Запишем функцию полной температуры суперпозиции

$$T_p = T_1 + T_2, \quad (6)$$

где  $T_1$ ,  $T_2$  — функции расчетных температур 1-го и 2-го тел (блоков).

Функция расчетной температуры для 1-й системы суперпозиции  $T_1$  определена как для сплошного упругого тела при функции пластичности тела<sup>6, 7</sup> —  $\beta^2 = 0$ :

$$T_1 = \frac{T_m}{K_s}, \quad (7)$$

где  $K_s$  — коэффициент, зависящий от плотности и теплоемкости 1-й и 2-й системы суперпозиции;

$T_m$  — заданная функция температуры.

Для решения задачи определения кольцевых термонапряжений в элементах 1-й и 2-й систем (перекрытиях, колоннах и ригелях каркаса в уровнях их сопряжений) запишем дифференциальное уравнение относительно неизвестных функций реакций  $q_{1,2\Theta}$  в уровне каждого диска-перекрытия при действии температуры в кольцевом направлении для 1-й и 2-й систем<sup>8</sup>:

$$\frac{dq_{1,2\Theta}}{d\Theta} + p_{1,2\Theta} q_{1,2\Theta} = \alpha_t T_{1,2} G_{1,2\Theta}, \quad (8)$$

где  $\alpha_t$  — коэффициент линейного расширения;

$G_{1,2\Theta}$  — коэффициенты жесткости ярусов (в кольцевом направлении):

$$G_{1,2\Theta} = \frac{12B_0\beta^2}{s_{1,2}h^3},$$

---

<sup>5</sup> Пантелеев Н.Н. О функции пластичности бетона // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1992. № 11–12. С. 117–118.

<sup>6</sup> Пантелеев Н.Н. Контигуализация каркасных систем зданий на температурные воздействия // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1984. № 9.

<sup>7</sup> Пантелеев Н.Н. О функции пластичности бетона // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1992. № 11–12. С. 117–118.

<sup>8</sup> Пантелеев Н.Н. Термоупругость строительных систем зданий и сооружений // Аналитический обзор ВНИИЭСМ. М., 1992. Вып. 1. С. 44–45.

здесь  $B_0$  — распределенная жесткость колонн;  
 $s_{1,2}$  — шаг колонн по дуге окружности с радиусами  $r_1 = a$ ,  $r_2 = b$ ;  
 $h$  — толщина перекрытий (диафрагм);  
 $p_\Theta = -\frac{G_\Theta \cdot 1}{h_{red} E_b}$  ( $1/\text{м}$ ) — параметры уравнения (8).

Решение дифференциального уравнения (8) известно (индексы опущены)

$$q_\Theta = e^{-P_\Theta} (C_1 + \alpha_t T_\Theta G_\Theta \int e^{P_\Theta} ds), \quad s_\Theta = \Theta r. \quad (9)$$

После несложных преобразований (9) запишется в виде

$$J = A \int \frac{B + e^{P_\Theta s}}{e^{P_\Theta s}} ds = A \int (B + e^{P_\Theta s}) ds, \quad (10)$$

$$\text{где } A = \frac{\alpha_t T_{2\Theta} G_{2\Theta}}{P_{2\Theta}}, \quad B = \frac{C_1}{A}.$$

Постоянная интегрирования  $C_1$  (при интегрировании (10) по частям) найдется в виде

$$C_1 = \frac{\alpha_t T_\Theta G_\Theta}{P_\Theta} [(-P_\Theta r \Theta_0 + 1) \cdot e^{P_\Theta r \Theta_0} - 1]. \quad (11)$$

Тогда получим выражение реакции в кольцевом секторе здания в уровне каждого диска-перекрытия (индексы опущены)

$$q_\Theta = -\frac{\alpha_t T_\Theta G_\Theta}{P_\Theta} [(-P_\Theta r \Theta_0 + 1) \cdot e^{P_\Theta(r\Theta_0 - r\Theta)} + (1 - e^{-P_\Theta \Theta})] \quad (12)$$

(основные аргументы  $0 < \Theta < \Theta_0$ ,  $r$  показаны на рис. 2).

Функция реакций  $q_{\Theta i}$  по этажам кольцевого сектора позволяет определить напряжения и деформации в перекрытиях

$$\sigma_r = \frac{E_b(\varepsilon_r + v\varepsilon_\Theta)}{1-v^2}, \quad \sigma_\Theta = \frac{E_b(\varepsilon_\Theta + v\varepsilon_r)}{1-v^2}, \quad (13)$$

$$\varepsilon_\Theta = \alpha_t T_{1,2} B_\Theta e^{-P_\Theta r \Theta}, \quad \varepsilon_r = \alpha_t T_{1,2} B_\Theta e^{-P_\Theta r \Theta} \cdot (1 - P_\Theta r \Theta), \quad (14)$$

здесь  $B_\Theta$  — жесткость колонн каркаса этажей кольцевого сектора в направлении дуги;

$v$  — коэффициент Пуассона.

С использованием вышеприведенных формул был произведен расчет кольцевого сектора на температурные воздействия с максимальным перепадом температуры  $\Delta T_{cp} = -73$  °С для строительного периода (неотапливаемое здание). Обследование строительных конструкций здания НГАТОиБ, проведенное институтом «Новосибгражданпроект» совместно с кафедрой железобетонных конструкций НГАСУ (Сибстрин) в 1970–1980 гг., показало значительные повреждения железобетонных конструкций в виде трещин (см. рис. 2) зрелицкой части здания. При исследовании этих дефектов были установлены причины трещинообразования в монолитных конструкциях (амфитеатр, наружные стены), касающиеся температурно-влажностных деформаций во время возведения здания в сибирских условиях строительства. При возведении стен барабана (1930–1931 гг.) методом замораживания и последующем оттаивании жесткость стен уменьшилась. Если принять

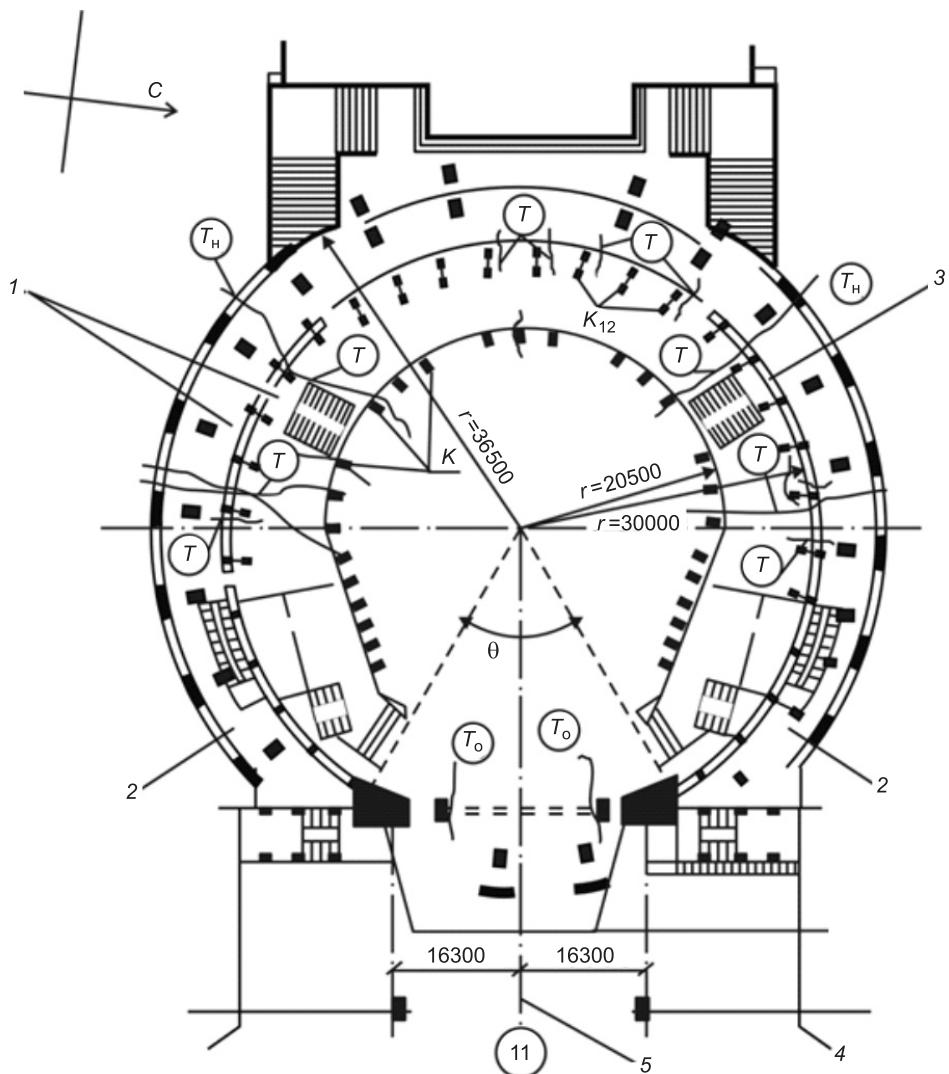


Рис. 2. Схематический план несущих конструкций зрелищной части театра  
 Т — трещины в плитах железобетонных кольцевых перекрытий отм. 0.000, 4.380, 8.800;  $T_h$  — трещины в наружных стенах;  $T_o$  — трещины в облицовке портала; К — колонны каркаса  
 1 — кирпичные стены барабана; 2 — кольцевые перекрытия; 3 — кольцевая стена-диафрагма (СД);  
 4 — пилоны рамы сценической коробки; 5 — центральная ось здания

толщину стены при наборе прочности при оттаивании  $h_{ct}^{\text{от}} = 0,19 \cdot 80 \approx 15$  см, то по результатам расчетов напряжения в перекрытиях  $\sigma_\theta > R_{bt,ser}$ . Первые трещины в перекрытии могли появиться уже при оттаивании кладки, с раскрытием их при прогибах под нагрузкой. Однако, как показали расчеты, при отсутствии стен на этажах значения растягивающих напряжений в бетоне перекрытий не превосходят  $\sigma_\theta = 0,60 \cdot 10^{-1}$  МПа. В этом случае напрашивается вывод, что жесткость в виде возведенных стен во время строительства оказалась крайне нежелательной.

Здесь приводятся итоги расчетов деформаций с применением математических методов расчета зданий на температурные воздействия, изложенные в статье выше. Как показали расчеты, причина возникновения трещин в стенах и перекрытиях кольцевого сектора — изменение жесткости стен.

Расчетные значения перепадов температуры наружного воздуха в 1930–1935 гг., полученные из источников архива г. Новосибирска, незначительно отличаются от расчетных данных после 2000 г.

Эпюра кольцевых напряжений, определенных расчетом на ЭВМ, показывает крайнюю неравномерность распределения напряжений по кольцу сектора (рис. 3).

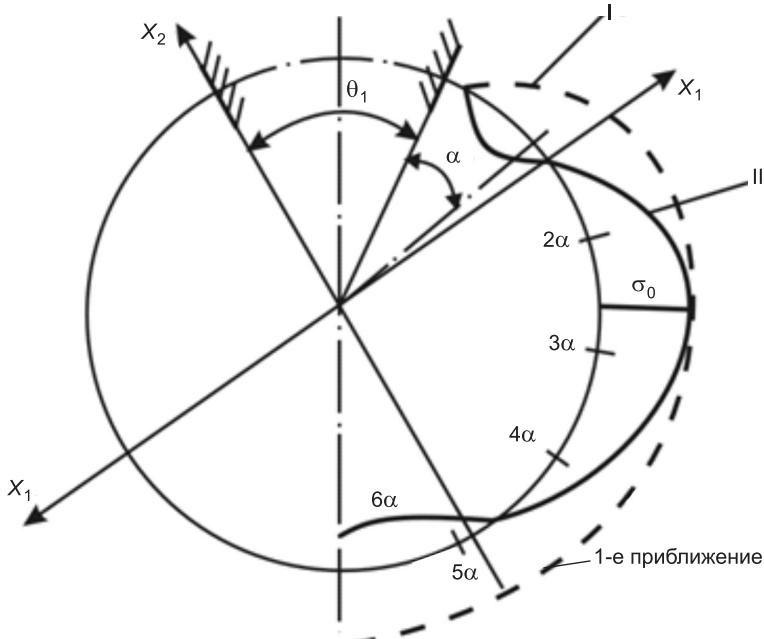


Рис. 3. Эпюра кольцевых напряжений  $\sigma_\theta / \sigma_{bt,ser}$  в железобетонных перекрытиях каркаса барабана (при оттаивании кладки кольцевых стен)

Можно предполагать, что в стадии эксплуатации здания театра перепад внутренней температуры  $\Delta_{tb}$  не может быть больше  $-30$  °С, поэтому повторно трещины в железобетонных перекрытиях барабана не появятся, и их рекомендуется замонолитить. Трещины же в наружных стенах барабана следует «расшить» с односторонней щитовой накладкой для обеспечения подвижности образовавшегося фиктивного температурного шва при повторных температурных воздействиях.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пантелеев, Н.Н. Нелинейные расчетные модели термодеформирования многоярусных систем зданий и сооружений : монография [Текст] / Н.Н. Пантелеев. — Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2003.
2. Пантелеев, Н.Н. Математические методы расчета цилиндрических систем зданий и сооружений на температурные воздействия : учеб. пособие [Текст] / Н.Н. Пантелеев, Б.С. Воробьев. — Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2010. — С. 46–50.
3. Пантелеев, Н.Н. Модельное представление термоупругости некоторых строительных систем методами механики деформированного твердого тела [Текст] / Н.Н. Пантелеев // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1989. — № 9.
4. Пантелеев, Н.Н. Распределение температуры в составных системах с упругопластическими средами [Текст] / Н.Н. Пантелеев // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1989. — № 6.

*ПАНТЕЛЕЕВ Н.Н., д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*БЕЗГЕММЕР Д.А., ассист.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено после доработки 12.10.11

**Panteleev N.N.**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Bezgemmer D.A.**, assistant, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE IN A CYLINDRICAL BUILDINGS ON TEMPERATURE EFFECT**

It is known that the building-construction experience complex stress state under the influence of temperature changes in the construction of the heating and cooling in the building and operation. In this paper we consider the stress-deformed state of cylindrical shape of a circular building in the plan. As an example the calculations of the climate temperature influence considered.

**Key words:** heat-transfer, integral, superposition, equation, density, thermal capacity, plasticity, radius, characteristics, argument, rigidity, stress, deformation.

### **REFERENCES**

1. Panteleev, N.N. Nonlinear Calculation Models Thermostraining Multistory Buildings and Facilities : Monograph [Text] / N.N. Panteleev. — Novosibirsk : NSUACE (Sibstrin), 2003.
2. Panteleev, N.N. Mathematical Methods of Calculation of Cylindrical Systems of Buildings and Constructions on Temperature Influences : the Educational Grant [Text] / N.N. Panteleev, B.S. Vorobjev. — Novosibirsk : NSUACE (Sibstrin), 2010. — P. 46–50.
3. Panteleev, N.N. Model representation of thermoelasticity some building systems using the mechanics of deformed solid [Text] / N.N. Panteleev // News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture. — 1989. — N 9.
4. Panteleev, N.N. Distribution of temperature in compound systems with elastic-plastic circles [Text] / N.N. Panteleev // News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture. — 1989. — N 6.

**УДК 624.04 : 519.2**

**В.Г. СЕБЕШЕВ**

## **КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

Для деформируемых систем, в которых осуществляется регулирование силовых факторов и других параметров напряженно-деформированного состояния, предложена комплексная характеристика надежности в зависимости от регуляторов, учитывающая ресурсоемкость и несущую способность. На модельных схемах конструкций с основными видами регуляторов получены оценки вероятности отказа при разных постановках задач регулирования, выявлены особенности изменения надежности при варьировании регуляторов. Определены возможности оптимального регулирования с учетом показателя надежности.

**Ключевые слова:** надежность, регулирование напряженно-деформированного состояния, ресурсоемкость, несущая способность.

Обеспечение надежности сооружений и строительных конструкций при одновременной минимизации объемов используемых ресурсов (материалов, стоимости и т.п.) либо достижении наибольшей возможной несущей способности является актуальной проблемой строительства на стадиях проектирования, возведения и эксплуатации строительных систем. Один из способов получения решений, оптимальных по ресурсоемкости или несущей способности, — регулирование (как средство управления инженерной системой, в том числе конструкцией, сооружением [1]), т.е. целенаправленное воздействие посредством различных технических приемов на характеристики поведения или состояния объекта с целью получения значений этих характеристик, выгодных по некоторому заранее принятому критерию. В результате обеспечивается наиболее эффективное вовлечение в работу материала, а следовательно, удается либо получить его экономию, удаляя избыточный материал (на стадии проектирования это достижимо), либо выявить ресурсы несущей способности системы и допустить ее эксплуатацию при увеличенной нагрузке. Принципиально важно то, что требования экономии ресурсов, в том числе за счет регулирования, и увеличения надежности инженерной (строительной) системы являются антагонистическими: выигрыш в расходе материала или стоимости приводит к снижению надежности. Поэтому актуально объединение задач оптимизации и расчета надежности, чему посвящен ряд работ, например [2]. В многочисленных работах отечественных и зарубежных исследователей рассмотрены также вопросы регулирования напряженно-деформированного состояния (НДС) различных строительных конструкций, особенно в аспекте предварительного напряжения. Но проблема оценки надежности строительных конструкций с регулируемыми параметрами НДС требует разработки.

В статье предложена комплексная характеристика для оценки надежности деформируемых систем, в которых осуществляется регулирование НДС, а также получены зависимости и числовые значения показателей

надежности модельных систем при разных постановках задач регулирования и типах регуляторов.

В зависимости от того, какие практические инженерные задачи решаются с применением регулирования НДС деформируемых систем, можно выделить следующие принципиальные постановки задач регулирования:

1) *проектная задача*, в которой предполагается возможность варьирования компонентов вектора регуляторов  $V = \{V_1 V_2 \dots V_{n_V}\}$  для достижения некоторого благоприятного результата, отвечающего используемому критерию регулирования; причем каждому вектору  $V$  ставится в соответствие определенный ресурс  $\Omega(V)$  (объем материала, стоимость объекта регулирования и т.п.) при некотором значении параметра воздействия (нагрузки)  $q$ ; также возможно, что  $q = q(V)$ , если отыскивается несущая способность (допускаемая нагрузка) с учетом эффекта регулирования;

2) *задача регулирования НДС при фиксированных параметрах системы и воздействий* (ресурс  $\Omega$  и характеристика воздействий  $q$  — инварианты регуляторов  $V$ ); такого рода задачи возникают при регулировании НДС существующих систем при заданных воздействиях, например, при реконструкции, усилении и т. п.;

3) *задача оптимального регулирования* по некоторому критерию оптимальности —  $\min \Omega(V)$ ,  $\max q(V)$ , а в расчетах надежности — минимум вероятности отказа или максимум надежности.

В проектной задаче предусматривается, что при изменении НДС вследствие изменения регуляторов  $V$  сразу выполняется пересчет либо распределения ресурса  $\Omega(V)$  (например, материала — путем уточнения характеристик сечений элементов системы по ограничениям прочности, жесткости, устойчивости и др.), либо параметра воздействий  $q(V)$  (несущей способности), либо одновременно  $\Omega(V)$  и  $q(V)$ .

В задаче, где регулирование осуществляется при сохранении неизменных  $\Omega$  и  $q$ , возможно получение более выгодных, чем в исходной системе (без регулирования), полей параметров НДС (напряжений, деформаций, перемещений).

В расчетах надежности все параметры конструкции, включая регуляторы, должны рассматриваться как случайные величины, причем стохастическая изменчивость свойств регуляторов может неблагоприятно сказываться на надежности системы — это должно быть учтено в вероятностном расчете.

Очевидно, что при отклонениях, в процессе варьирования регуляторов, от оптимального состояния системы ресурс (расход материала, стоимость)  $\bar{\Omega}(k_r)$  (в математическом ожидании) как функция от характеристик регулирования  $k_r$  возрастает, а в случае определения допускаемой нагрузки из ограничений по прочности и др. при фиксированном расходе и распределении материала параметр воздействия (нагрузки)  $\bar{q}(k_r)$  уменьшается. Здесь и далее под  $k_r$  понимаются некоторые величины, возможно безразмерные (коэффициенты), посредством которых описывается связь между регулируемыми параметрами НДС конструкции в условиях (уравнениях) регулирования.

Возможны варианты постановки задачи, когда одновременно могут изменяться и  $\bar{\Omega}(k_r)$ , и  $\bar{q}(k_r)$ . В этом случае, особенно с учетом того, что изменения этих величин могут происходить и односторонне (производные  $d(\dots)/dk_r \ll +, +$  или  $\ll -, -$ ), и разносторонне ( $\ll +, -$  или  $\ll -, +$  — рис. 1, а, б, где для принципиальной иллюстрации используется  $k_r$  в случае применения одного регулятора;  $k_{r0}$  соответствует минимуму

ресурса), целесообразно вводить в рассмотрение их отношение – удельный (на единицу нагрузки) показатель ресурсоемкости

$$\omega(k_r) = \frac{\bar{\Omega}(k_r)}{\bar{q}(k_r)}. \quad (1)$$

В оптимизационной постановке  $\omega(k_r)$  становится целевой функцией, и наиболее удачное регулирование соответствует ее минимуму (рис. 1, в, причем  $k_{r,opt,\omega}$  в общем случае не совпадает с  $k_{r0}$ ).

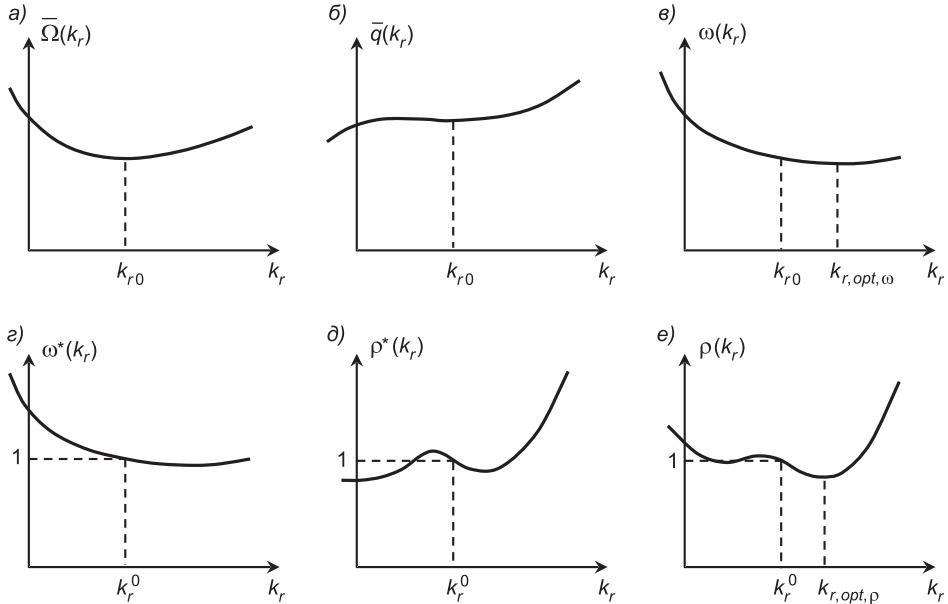


Рис. 1. Характеристики системы в зависимости от параметра регулирования

Если основной целью является оценка надежности системы  $N_S$  (или вероятности отказа  $P_S(0) = 1 - N_S$ ), то требуется выявить зависимость  $N_S$  или  $P_S(0)$  от  $k_r$ . В разных вариантах постановки задачи регулирования НДС надежность  $N_S(k_r)$  или вероятность отказа  $P_S(0, k_r)$  при варьировании регуляторов (или, что взаимосвязано, параметров регулирования  $k_r$ ) могут либо увеличиваться, либо уменьшаться, причем, возможно, разнонаправленно с характеристикой  $\omega(k_r)$ . В случае противоположных изменений для общей оценки эффекта регулирования имеет значение, какое из них происходит быстрее<sup>1</sup>. Поэтому предлагается ввести в качестве комплексного оценочного параметра произведение  $P_S(0, k_r) \cdot \omega(k_r)$ . Еще удобнее привести этот показатель к безразмерному виду путем использования вместо  $\bar{\Omega}(k_r)$ ,  $\bar{q}(k_r)$  и  $P_S(0, k_r)$  отношений  $\bar{\Omega}(k_r) / \bar{\Omega}_0 = \omega(k_r)$ ,  $\bar{q}(k_r) / \bar{q}_0 = q^*(k_r)$  и  $P_S(0, k_r) / P_S^0(0) = \rho^*(k_r)$  соответственно, где  $\bar{\Omega}_0$ ,  $\bar{q}_0$  и  $P_S^0(0)$  — при некотором базисном  $k_r^0$ , например, для системы без регулирования. В результате приходим к комплексной характеристике вероятности отказа с учетом ресурсоемкости и несущей способности:

$$\rho(k_r) = \rho^*(k_r) \cdot \omega^*(k_r), \quad (2)$$

где  $\omega^*(k_r) = \omega(k_r) \cdot q^*(k_r)$ .

<sup>1</sup> В связи с этим в [2] обсуждается вопрос об оптимальном распределении ресурса (стоимости) между более и менее дорогостоящими неравнонадежными элементами системы.

Характеристики  $\omega(k_r)$ ,  $q^*(k_r)$ ,  $\omega^*(k_r)$  и  $\rho^*(k_r)$  равны 1 при  $k_r = k_r^0$ . Графики функций  $\omega(k_r)$  и  $k^*(k_r)$  подобны соответственно  $\bar{\Omega}(k_r)$  и  $\bar{q}(k_r)$  (см. рис. 1, а, б), а для  $\omega^*(k_r)$  и  $\rho^*(k_r)$  приведены на рис. 1, г, д. Функция  $\rho(k_r)$  также имеет значение, равное 1 при  $k_r = k_r^0$  (рис. 1, е). Наилучшим по оценке с помощью комплексного показателя  $\rho(k_r)$  будет регулирование  $k_{r, opt, \rho}$ , дающее минимум величины  $\rho(k_r)$ .

Применение предложенной характеристики рассмотрено на модельных задачах расчета надежности плоских балочных и комбинированных систем, в которых регулирование силовых факторов осуществляется наиболее характерными способами — изменением соотношений характеристик жесткостей  $\tilde{E}\tilde{I}$ ,  $\tilde{E}\tilde{A}_j$ ,  $\tilde{c}$  элементов и опоры (рис. 2, а, г), смещением связей  $\tilde{\Delta}$  (рис. 2, б) и силовым предварительным напряжением  $\tilde{N}_0$  (рис. 2, в, д). Здесь и далее « $\sim$ » — символ случайной величины. Кроме аналогий задач регулирования для модели 1 и системы 1, а также соответственно модели 3 и системы 2, можно указать на качественное сходство (по математическому описанию) задач для моделей 2 и 3, несмотря на различие в регуляторах. Во всех случаях используются способы регулирования, основанные на чувствительности параметров НДС статически неопределеных систем к варьированию распределений жесткостей, а также к начальным напряжениям и деформациям. Вследствие того, что все модели представляют собой системы с одной лишней связью, для каждой из них может быть использован только один регулятор  $\tilde{V}$  ( $n_V = 1$ ), роль которого в рассматриваемых задачах играет либо  $\tilde{\Delta}$ , либо  $\tilde{N}_0$ , либо отношение  $\tilde{E}\tilde{I} / \tilde{c}$ . Для определения математического ожидания регулятора  $\tilde{V}$  служит условие (уравнение), выражающее сформулированное по некоторому критерию требование к ожидаемому результату регулирования. Во всех моделях предполагалось назначение некоторого соотношения математических ожиданий фибрьных напряжений в двух характерных сечениях 1 и 2 (см. рис. 2) — с наибольшим пролетным изгибающим

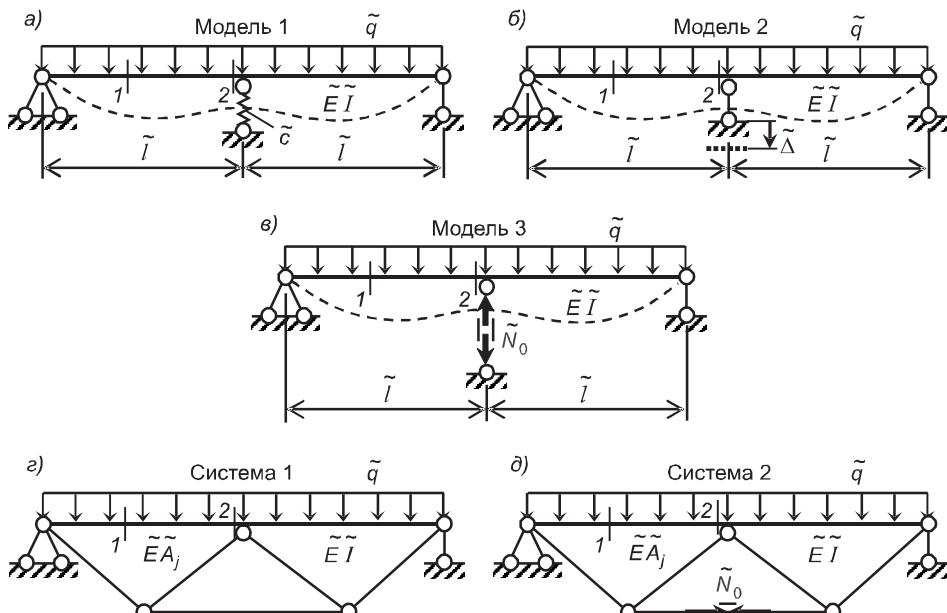


Рис. 2. Модельные схемы конструкций с различными способами регулирования силовых факторов

моментом и посредине балки. В качестве характеристики (параметра) регулирования  $k_r$  принималось отношение математических ожиданий моментов в указанных сечениях:  $k_r = \bar{M}_2 / \bar{M}_1$ . Уравнение регулирования для модели 1 и системы 1 — нелинейное, даже если модель рассматривается как линейно деформируемая система (ЛДС). Это объясняется тем, что в качестве регулятора выступает собственная характеристика конструкции — отношение жесткостей. В остальных случаях регулятор является внешним воздействием на систему, поэтому уравнение регулирования в расчете ЛДС — линейное.

Зависимости регулируемых  $\tilde{M}_1$  и  $\tilde{M}_2$  (с помощью которых и соответствующих им продольных сил  $\tilde{N}_1$  и  $\tilde{N}_2$  определяются напряжения  $\tilde{\sigma}_1$  и  $\tilde{\sigma}_2$ ) от заданной случайной нагрузки  $\tilde{q}_1$ , регулятора  $\tilde{V}$  и случайных расчетных параметров системы находятся расчетом по методам строительной механики.

В решении основной задачи — расчете надежности — использованы условия безотказности (работоспособности) по требованиям первой группы расчетных предельных состояний в предположении упругой работы конструкции, обобщенно записываемые, следя А.Р. Ржаницыну и В.Д. Райзеру [3, 4], как

$$\tilde{Q}_i \leq \tilde{R}_i, \quad i = 1, n_0, \quad (3)$$

где  $\tilde{Q}_i$  и  $\tilde{R}_i$  — обобщенные нагрузочный фактор и характеристика собственных (прочностных) свойств системы по  $i$ -му условию безотказности;  $n_0$  — количество учитываемых требований работоспособности.

Для моделей 1, 2 и 3:  $n_0 = 2$ ,  $\tilde{Q}_i \equiv \tilde{\sigma}_i$  — фибровое напряжение в  $i$ -м расчетном сечении ( $i = 1, 2$ ),  $\tilde{R}_i \equiv \tilde{\sigma}_{ui}$  — предел текучести материала. Для систем 1 и 2 — четыре условия прочности (для сечений 1 и 2 балки при изгибе со сжатием и двух, с учетом симметрии, растянутых стержней шпренгельной части) и одно условие устойчивости (для любого из двух симметрично расположенных сжатых элементов шпренгеля), всего  $n_0 = 5$ . При этом для сжатого стержня  $\tilde{\sigma}_{ui}$  — критическое напряжение.

Введя в рассмотрение случайную величину  $\tilde{S}_i = \tilde{R}_i - \tilde{Q}_i$  — резерв обобщенной прочности (работоспособности) по  $i$ -му критерию (условию) безотказности, находим вероятность отказа по указанному критерию как

$$P_{Si}(0) = \int_{-\infty}^0 p_{Si}(S_i) dS_i, \quad (4)$$

где  $p_{Si}(S_i)$  — плотность распределения резерва  $\tilde{S}_i$ .

При известном законе  $p_{Si}(S_i)$  вероятность отказа  $P_{Si}(0)$  может быть найдена по характеристике безопасности  $\beta_{Si} = \bar{S}_i / \hat{S}_i$  ( $\bar{S}_i$  и  $\hat{S}_i$  — соответственно математическое ожидание и стандарт  $\tilde{S}_i$ ), например, для нормального распределения — с помощью интеграла вероятности. Все  $\tilde{Q}_i \equiv \tilde{\sigma}_i$  зависят от характеристики регулирования  $k_r$ , поэтому вероятности отказа являются функциями от  $k_r$ :  $P_{Si}(0) = P_{Si}(0, k_r)$ . Тогда общая вероятность отказа системы по всей совокупности условий безотказности

$$P_S(0, k_r) = \sum_{i=1}^{n_0} P_{Si}(0, k_r). \quad (5)$$

Проиллюстрируем процедуру вычисления  $P_S(0)$  на примере модели 2 (см. рис. 2, б). Характеристики безопасности для двух расчетных сечений балки ( $i = 1, 2$ ):

$$\beta_{Si} = \frac{\bar{S}_i}{\hat{S}_i} = \frac{\bar{\sigma}_{ui} - \bar{\sigma}_i}{\sqrt{\hat{\sigma}_{ui}^2 + \hat{\sigma}_i^2}} = \frac{1 - \xi_i}{\sqrt{A_{\sigma u}^2 + \xi_i^2 A_{\sigma i}^2}}, \quad (6)$$

где  $A_{\sigma i}, A_{\sigma u}$  — коэффициенты вариации напряжения в  $i$ -м сечении и предела текучести;  $\xi_i = \bar{\sigma}_{ui} / \bar{\sigma}_i$  — коэффициент, характеризующий уровень нагруженности  $i$ -го сечения (обратный по отношению к коэффициенту запаса по А.Р. Ржаницыну [3]). Определив стандарты напряжений  $\hat{\sigma}_i$  методом статистической линеаризации, находим коэффициенты вариации

$$A_{\sigma i} = \hat{\sigma}_i / \bar{\sigma}_i = \sqrt{A_{Mi}^2 + A_{Wi}^2}, \quad (7)$$

где  $A_{Wi}$  — коэффициенты вариации моментов сопротивления сечений;  $A_{Mi}$  — коэффициенты вариации изгибающих моментов, для которых получены выражения

$$A_{Mi} = \sqrt{(\gamma_{qi} A_q)^2 + (\gamma_{li} A_l)^2 + \gamma_i^2 \cdot (A_{Cb}^2 + A_V^2)}, \quad (8)$$

где  $\gamma_{q1} = 1 - \gamma_1, \gamma_{q2} = 1 + \gamma_2, \gamma_1 = 2 - 3/(4\chi), \gamma_2 = (2\chi - 0,75)/(1 - 2\chi), \gamma_{l1} = 2(1 - 2\gamma_1), \gamma_{l2} = 2(1 + 2\gamma_2)$  — коэффициенты влияния на напряжения  $\bar{\sigma}_1$  и  $\bar{\sigma}_2$  вариативности нагрузки  $\bar{q}$ , длины пролета  $\tilde{l}$ , жесткости сечения балки  $\tilde{C}_b = \tilde{E}\tilde{I}$  и регулятора  $\tilde{V}$ ;  $\chi = (1 - \sqrt{1 - k_r}) / k_r$ ;  $A_q, A_l, A_{Cb}, A_V$  — коэффициенты вариации нагрузки, длины, жесткости и регулятора.

Необходимое для вычисления  $A_V$  значение математического ожидания регулятора  $\bar{V}$  найдено решением задачи регулирования:

$$\bar{V} = \frac{\bar{q}\tilde{l}^4}{24\tilde{E}\tilde{I}} \left[ \frac{8}{k_r} (1 - \sqrt{1 - k_r}) - 3 \right]. \quad (9)$$

Аналогично получены расчетные зависимости для остальных систем по рис. 2. Далее для всех моделей были выполнены вычисления вероятностей отказа при конкретных числовых значениях статистических характеристик параметров конструкций и нагрузки<sup>2</sup>:  $\tilde{l} = 6$  м;  $A_l = 0,005; A_{\sigma u} = 0,06$ ; сечение — двутавр Б40,  $A_W = 0,02$ ; для коэффициентов вариации нагрузки  $A_q$  и регулятора  $A_V$  задавались различные значения в интервале от 0,01 до 0,06. Для выявления зависимости  $P_S(0, k_r)$  параметр регулирования  $k_r$  варьировался от -0,6 до -1,5. Математическое ожидание нагрузки  $\bar{q}$  задавалось неявно — посредством коэффициентов  $\xi_1 \vee \xi_2 = 0,75$ ; при этом принималось, что каждому значению  $k_r$  соответствует определенное значение  $\bar{q}(k_r)$ , т.е. решалась проектная задача регулирования при фиксированном ресурсе (объеме материала), но переменной нагрузке. Результаты расчетов представлены на рис. 3 в виде графиков  $P_S(0, k_r)$  для двух вариантов вероятностных характеристик нагрузки и регулятора: В1 ( $A_q = A_V = 0,01$ ) и В2 ( $A_q = 0,06; A_V = 0,05$ ). На рис. 3, а, б даны графики для конструкций, сходных по

<sup>2</sup> В выполнении расчетов принимал участие магистр техники и технологии Д.С. Яровенко.

типу регулирования. Все графики имеют характерную «пикообразную» форму с наибольшим значением вероятности отказа при  $k_r = -1$ , что соответствует выровненным по абсолютным величинам моментам в сечениях 1 и 2. Следовательно, для увеличения надежности в проектной постановке задачи целесообразно регулировать усилия таким образом, чтобы не приближать конструкцию к состоянию «равнонапряженности». Заметим, что по графикам рис. 3 не во всех случаях очевид-

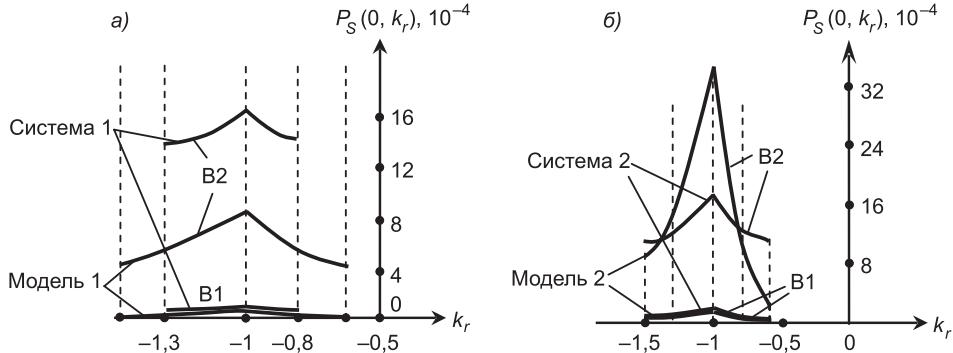


Рис. 3. Графики зависимости вероятности отказа от коэффициента регулирования

но, в каком направлении лучше отступать от точки  $k_r = -1$  (некоторые графики почти симметричны в окрестности вершины). Если же применить комплексную характеристику (2), учитывающую вышеуказанную зависимость допускаемой нагрузки от  $k_r$  (при постоянном ресурсе  $\bar{\Omega}(k_r) = \text{const}$ , чему отвечает  $\omega(k_r) = \text{const} = 1$ ), то графики  $\rho(k_r)$  получаются существенно асимметричными (рис. 4), причем для моделей 1 и 2 резкое уменьшение удельной (с учетом изменения допускаемой нагрузки) вероятности отказа наблюдается при отклонении вправо от точки  $k_r = -1$  (рис. 4, а), а для комбинированных систем 1 и 2 — влево (рис. 4, б).

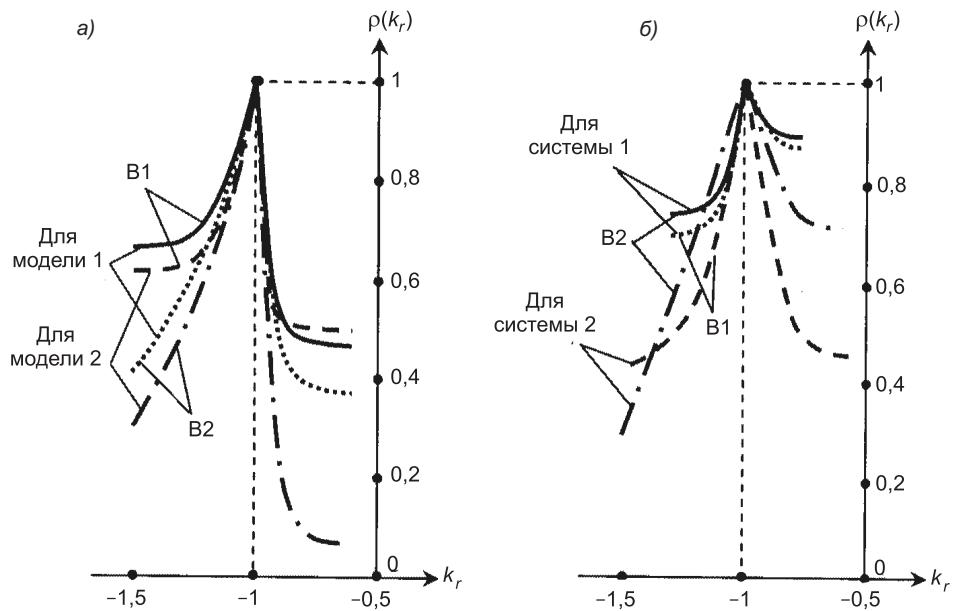


Рис. 4. Комплексная характеристика вероятности отказа с учетом материоемкости и несущей способности для случая проектной постановки задачи регулирования

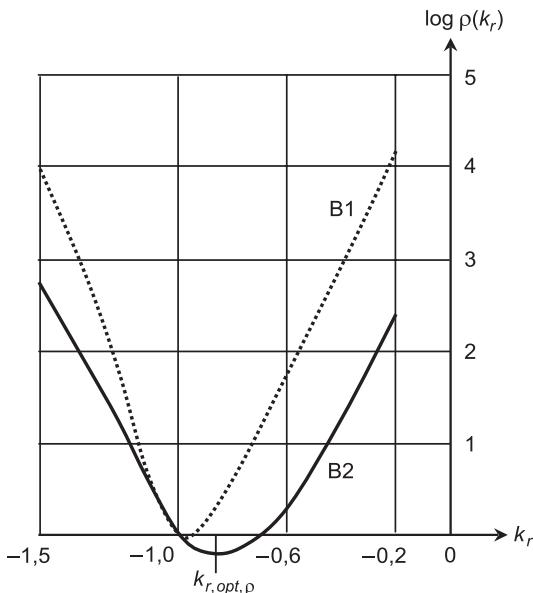


Рис. 5. Комплексная характеристика вероятности отказа для модели 2 при фиксированной нагрузке и заданном сечении балки

Полученные результаты позволяют качественно обосновывать принимаемые решения по проектированию конструкций с регулированием силовых факторов в них с учетом требований надежности. Предложенная комплексная характеристика вероятности отказа может использоваться для количественной оценки надежности указанного класса конструкций.

Дополнительно был выполнен расчет надежности модельной конструкции по рис. 2, б в другой постановке задачи регулирования — при фиксированной нагрузке и сечении балки, т.е. при  $\omega(k_r) = q^*(k_r) = \text{const} = 1$ . В этом случае график функции  $\rho(k_r)$  получился гладким, с минимумом вблизи точки  $k_r = -1$  (рис. 5).

Это свидетельствует о возможности оптимального регулирования. Но оптимальное значение характеристики  $k_{r,opt,\rho}$  не совпадает с  $k_0 = -1$ , соответствующим детерминистическому решению с выровненными напряжениями в расчетных сечениях.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абовский, Н.П. Управляемые конструкции [Текст] / Н.П. Абовский. — Красноярск : КрасГАСА, 1998. — 420 с.
2. Гениев, Г.А. Вопросы оптимизации расхода материалов в многоэлементных системах с позиций минимальной вероятности их отказа [Текст] / Г.А. Гениев // Изв. вузов. Строительство. — 2002. — № 1–2. — С. 17–22.
3. Ржаницын, А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность [Текст] / А.Р. Ржаницын. — М. : Стройиздат, 1978. — 239 с.
4. Райзэр, В.Д. Теория надежности в строительном проектировании [Текст] / В.Д. Райзэр. — М. : Изд-во АСВ, 1998. — 304 с.

СЕБЕШЕВ В.Г., канд. техн. наук, проф.; E-mail: vgsebeshev@ngs.ru  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 15.09.11

**Sebeshev V.G.**, candidate of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

#### COMPLEX EVALUATION OF THE RELIABILITY OF STRUCTURES WITH REGULATED STRESS-STRAIN STATE PARAMETERS

The complex reliability's characteristic in dependence on the regulators with taking into account the resources and load carrying capacity is offered for the structures with regulation of the internal forces and other parameters of the stress-strain state. For some structural

models with main kinds of regulators the evaluations of failure's probability were done according to the different variants of consideration of the regulation's problem. The peculiarities in changes of the reliability in connection with the regulator's varying were revealed. The possibilities of the optimal regulation in aspect of reliability were determined.

**Key words:** reliability, stress-strain state regulation, resource, load carrying capacity.

#### REFERENCES

1. Abovsky, N.P. Controllable Structures [Text] / N.P. Abovsky. — Krasnoyarsk : Krasnoyarsk SACE, 1998. — 420 p.
  2. Geniyev, G.A. Problems of materials volume optimization in multi-elements systems from the positions of minimal probability of their failure [Text] / G.A. Geniyev // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2002. — N 1–2. — P. 17–22.
  3. Rzhanitsyn, A.R. Theory of Structures Design for Reliability [Text] / A.R. Rzhanitsyn. — M. : Stroyizdat, 1978. — 239 p.
  4. Raizer, V.D. Theory of Reliability in Construction Design [Text] / V.D. Raizer. — M. : Publ. of Construction Higher Educational Institutions Association, 1998. — 304 p.
-

## **В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ**

**УДК 624.131**

**Д.В. ГРИШИН**

### **ОСАДКИ ШТАМПА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ РАЗМЕРОВ ОБЛАСТИ АРМИРОВАНИЯ ПЕСЧАННОГО ОСНОВАНИЯ**

Экспериментально установлена степень уменьшения сжимаемости усиленного основания в зависимости от размеров зоны усиления. Оценка эффективности усиления основания расчетными методами расходится с данными эксперимента.

**Ключевые слова:** усиление основания, модули деформации, эксперимент, расчеты.

Усиление грунтового основания с целью получения более высоких характеристик прочности и жесткости является перспективным направлением в фундаментостроении. В качестве одного из способов усиления основания в последнее время все большее применение находит метод высоконапорного инъектирования песчано-цементной смеси в зону активного воздействия фундамента. В результате твердения смеси получается грунтовый массив, обладающий свойствами геокомпозита. Однако при оценке механических свойств геокомпозитного основания встречаются серьезные затруднения, препятствующие широкому и обоснованно надежному применению метода инъектирования с целью усиления грунтовых оснований и массивов.

В существующих методах расчета, на которых базируется нормативная литература (СНиП 2.02.01–83\*. Основания зданий и сооружений; СНиП 2.02.02–85\*. Основания гидротехнических сооружений), применяется модель линейно деформируемого основания, где используются постоянные значения модуля деформации  $E$  и прочностных характеристик  $\phi$  и  $c$ . При усилении основания высоконапорным инъектированием раствора в фиксированном горизонтальном направлении [1] получается геокомпозитный материал с существенными различиями характеристик грунта как за счет жестких включений, так и за счет изменения плотности грунта (реализующейся при внедрении материала уплотнителя)<sup>1</sup>. В связи с этим ряд авторов, в том числе З.Г. Тер-Мартиросян, Г.А. Ванин и др., предлагают определять эквивалентные (приведенные) характеристики деформируемости геокомпозитного материала.

Эквивалентные модуль деформации  $E$  и коэффициент Пуассона  $v$  устанавливаются в зависимости от процентного содержания и специфики заполнителей и твердых включений. В частности, для полидисперсной модели с цилиндрическими включениями разного диаметра модуль сдви-

<sup>1</sup> С аналогичных позиций можно рассматривать и армированные грунтовые массивы, и основания, включая сюда армирование с помощью применения сетки анкеров, нагелей, геопластики и др.

га  $G_{23}$  в условиях плоской деформации рекомендуется вычислять по зависимостям 2.123 [2]:

$$G_{23} = G_2 + \frac{\frac{G_2 \cdot n}{G_1 - G_2 + \frac{K_2 + 7 \cdot G_2}{2 \cdot K_2 + 8 \cdot G_2}}}{}, \quad (1)$$

где  $K_2$  и  $G_2$  — модули объемной деформации и сдвига заполнителя;  $K_1$  и  $G_1$  — модули объемной деформации и сдвига материала включений;  $n$  — доля (по объему) материала включений.

Объемные модули и модули сдвига для линейно деформируемого («упругого») материала заполнителя и включений вычисляются по известным зависимостям:

$$K_i = \frac{E_i}{(1-2v_i)}; \quad G_i = \frac{E_i}{[2(1+v_i)]}. \quad (2)$$

По аналогичным зависимостям (2) при установленной величине  $G_{23}$  вычисляется модуль деформации  $E$  гомогенной среды, эквивалентной по деформируемости исходному гетерогенному материалу.

Однако эти теоретические зависимости, базирующиеся на механике упругих (или линейно деформируемых) геокомпозитных сред, на сегодняшний день экспериментально подтверждены недостаточно, в особенности для грунтовых оснований, где линейные связи между напряжениями и деформациями нарушаются уже при малых нагрузках на основание.

Кроме теоретических методов оценки грунтовых геокомпозитных сред проводились также экспериментальные исследования этого направления. Так, институтом ДальНИИС разработана методика «Оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями» [3], в которой приводится регрессионная зависимость, отражающая связь между модулем деформации  $E$  и так называемым физическим эквивалентом грунтов и некоторыми физическими характеристиками:

$$E = k_E \cdot k_p \cdot k_L \cdot \frac{1}{0,088 \cdot m_\tau - 0,15 \cdot m_\tau \cdot J_p + 0,017}, \quad (3)$$

где  $m_\tau$  — физический эквивалент грунта;

$J_p$  — число пластичности пылевато-глинистого заполнителя, д.е.;

$k_E$  — коэффициент, учитывающий прочность крупных обломков;

$k_L$  — коэффициент, зависящий от физического эквивалента грунта  $m_\tau$  и показателя текучести пылевато-глинистого заполнителя  $J_L$ ;

$k_p$  — коэффициент, учитывающий плотность грунта в зависимости от соответствия фактической плотности грунта ее нормативным значениям.

По аналогичным зависимостям определяются прочностные характеристики  $\phi$  и  $c$ . Однако эта методика подходит для грунтов определенного состава, поэтому имеет ограниченную область применения.

Из вышеизложенного следует, что постановка экспериментальных исследований в этом направлении является задачей актуальной, имеющей большое практическое значение. В связи с этим проведены лабораторные исследования сжимаемости геокомпозитного основания штампа с целью проверки достоверности некоторых расчетных методов. При этом «для оценки тех или иных расчетных методов определения осадки, необходимые расчеты должны быть произведены применительно к разме-

рам штампа<sup>2</sup>. Задача математического моделирования с учетом основных положений теории подобия в применении к таким сложным материалам, как геокомпозиты, не ставилась.

Лабораторные исследования проводились в грунтовом лотке размером в плане  $1 \times 0,38$  м и глубиной 0,5 м. Использовалась модель незаглубленного полосового штампа с шириной подошвы  $b = 0,1$  м (условия плоской деформации). Грунт — максимально рыхлый среднезернистый песок с удельным весом  $\gamma = 16,7$  кН/м<sup>3</sup>, углом внутреннего трения  $\varphi = 28^\circ$ , сцеплением  $c = 1$  кПа, коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,3$  и расчетным сопротивлением  $R = 13,6$  кН/м<sup>2</sup>. На основании лотковых экспериментов на рыхлом песчаном основании был получен модуль деформации  $E = 1,24$  МПа.

Для создания лотковой модели геокомпозита выполнялось армирование основания деревянными брусками квадратного сечения 1×1 см и длиной 37 см, укладываемыми под штампом поперек лотка (рис. 1). Нагрузка на штамп передавалась ступенями по 0,66 кН. Перемещения штампа определялись двумя прогибомерами с ценой деления 0,1 мм. После достижения

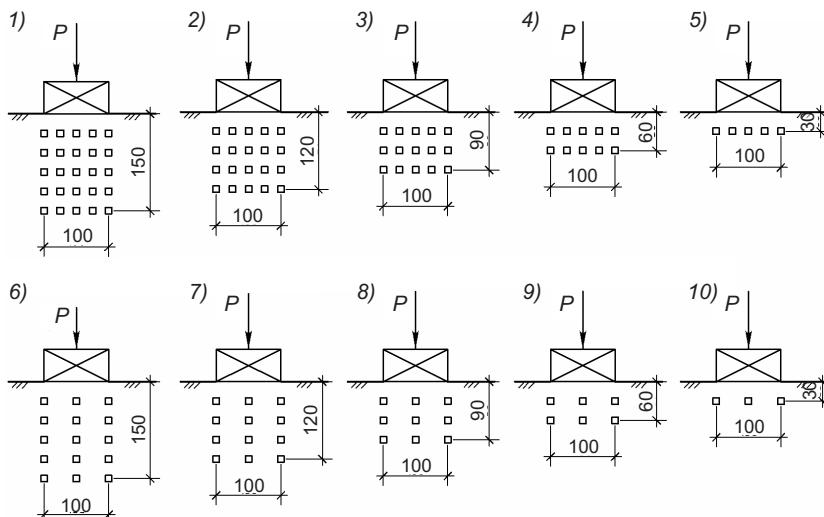


Рис. 1. Схемы армирования грунтового основания (1÷5) — серия опытов I,  
(6÷10) — серия опытов II

максимальной осадки штампа, составляющей  $S_{\max} \approx 0,4b$ , выполнялась его разгрузка. Модули деформации основания определялись также по формуле Шлейхера, полученные при этом результаты представлены на рис. 2.

Оценка показателей сжимаемости геокомпозитного материала в зоне расположения армэлементов проведена с применением формулы (1). При максимальных размерах армированной зоны ( $0,15 \times 0,15$  м) и максимальном, принятом в опытах проценте армирования  $n = 0,1$  (10 %) (однофакторный эксперимент), модуль сдвига геокомпозитной среды в плоскости деформирования основания  $G_{23} = 0,57$  МПа и эквивалентный модуль  $E_{23} = 1,42$  МПа. Осадка штампа, вычисленная по методу элементарного суммирования деформаций (по СНиП 2.02.01-83\*) при  $p_{cp} = 13$  кН/м<sup>2</sup>  $\approx R = 13,6$  кН/м<sup>2</sup>, при расположении штампа на усиленном основании составила  $S' = 1,50$  мм, осадка штампа на естественном основании  $S_0 = 1,63$  мм. Увеличение осредненного модуля деформации

<sup>2</sup> Флорин В.А. Основы механики грунтов. 1959. Т. 1. С. 93.

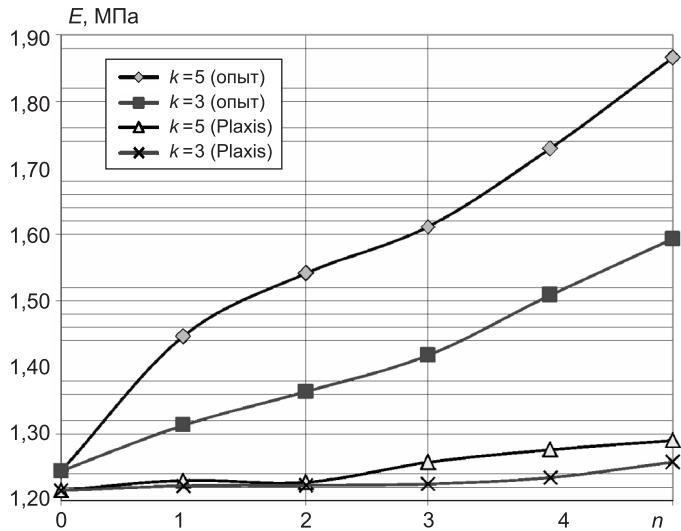


Рис. 2. Зависимость эквивалентного модуля деформации усиленного основания от степени его армирования  
n и k — количество рядов и столбцов армоэлементов соответственно

$E'_o$  усиленного основания обратно пропорционально приведенным значениям осадок, т.е.  $E'_o = \frac{S_o}{S'} \cdot E = \frac{1,63}{1,50} \cdot 1,24 = 1,35$  МПа, что на 8 % выше начального значения  $E = 1,24$  МПа.

Численные эксперименты проводились на программном комплексе Plaxis 2D [4]. Расчетная схема симметрична относительно оси штампа; габариты расчетной схемы приняты по размерам лотка; закрепления на границах расчетной схемы стандартные (рис. 3). Моделирование армоэлементов выполнялось в виде линейно деформируемых включений (в местах установки армоэлементов) с характеристиками деформируемости древесины

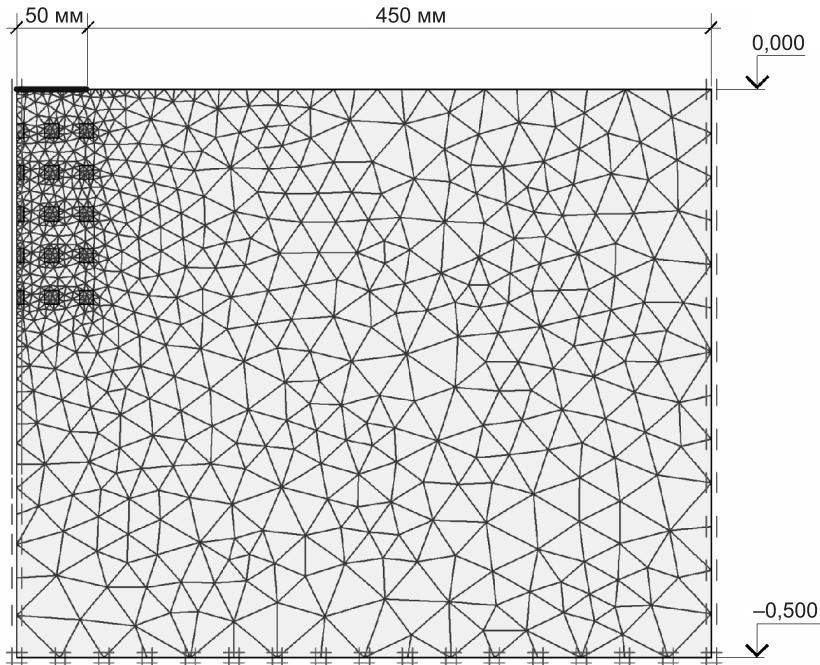


Рис. 3. Расчетная схема армирования основания

в поперечном направлении. Для моделирования песчаного основания в расчетах принята бездилатансионная упругоидеально-пластическая модель грунта Кулона–Мора. Физико-механические характеристики грунта основания равны приведенным выше. Коэффициент снижения прочности в интерфейсах на контакте элементов армирования с грунтом основания принимался равным единице (на основании дополнительно проведенных исследований по определению сопротивления одноплоскостному срезу). Решалась обратная задача — по заданным перемещениям штампа вычислялись напряжения и другие показатели напряженно-деформированного состояния основания. На рис. 4 и 5 соответственно представлены изолинии полей вертикальных напряжений и перемещений в зоне армирования.

По рис. 4 можно установить седлообразную форму эпюры вертикальных контактных давлений, их общее уменьшение (в зоне усиления) по направлению вниз от штампа и в сторону от оси симметрии системы «штамп — основание», участки концентрации напряжений и сложный характер распределения напряжений в грунтовой среде между включениями (что существенно осложняет экспериментальное исследование этого вопроса).

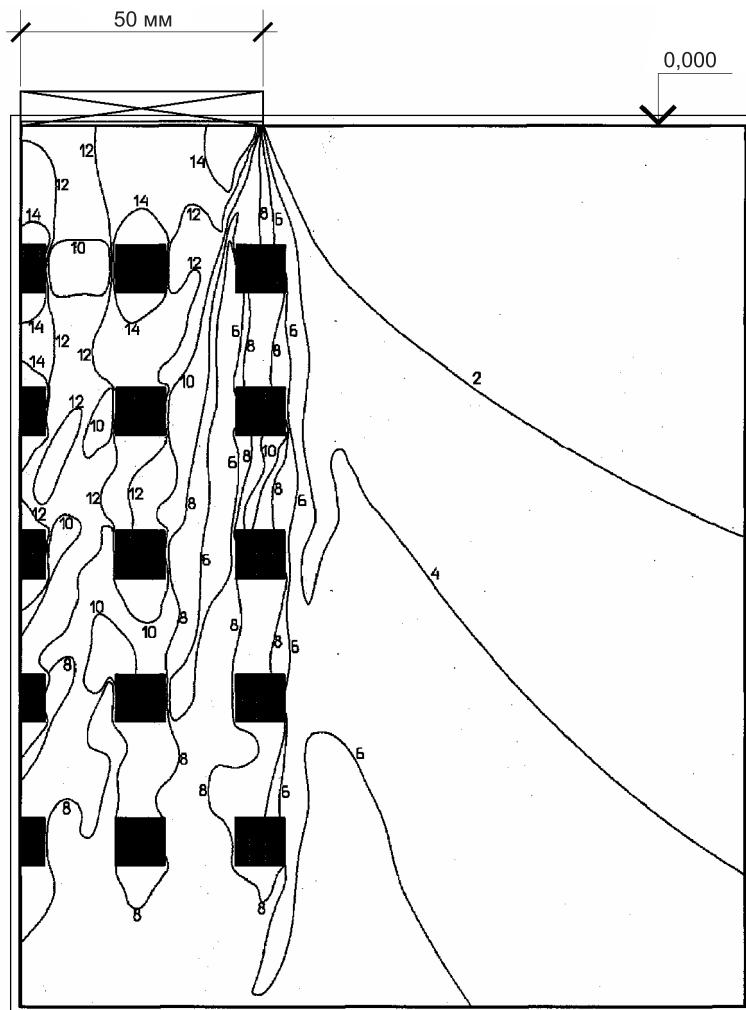


Рис. 4. Изолинии распределения вертикальных напряжений ( $\text{kN}/\text{m}^2$ ) в зоне армирования при среднем давлении на грунт под подошвой штампа  $p = 13,0 \text{ kN}/\text{m}^2$

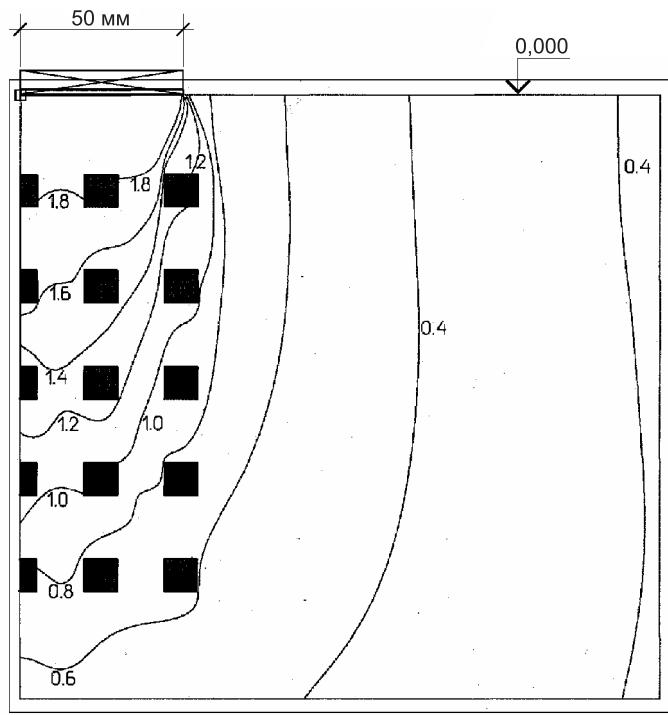


Рис. 5. Изолинии распределения вертикальных перемещений (мм) в зоне армирования при среднем давлении на грунт под подошвой штампа  $p=13,0 \text{ кН/м}^2$

На рис. 5 видна область формирующегося «уплотненного ядра» под штампом с одинаковым вертикальным смещением точек его контура; заметно уменьшение вертикальной компоненты перемещений точек основания, расположенных на одинаковой глубине, но удалющихся от оси симметрии (к сожалению, соответствующее увеличение горизонтальной компоненты перемещений этих точек в силу ограниченного объема статьи показать не представляется возможным). Видны локальные возмущения в очертаниях изолиний, вызванные инородными включениями.

Определение модуля деформации выполнялось по формуле Ф. Шлейхера (что для сопоставительных расчетов представляется оправданным):

$$E = \frac{\omega \cdot p_0 \cdot b \cdot (1 - v^2)}{S}. \quad (4)$$

Здесь  $\omega = 2,12$  — коэффициент, зависящий от формы площади и жесткости фундамента, для жесткого штампа;

$p_0$  — среднее рассчитанное значение дополнительного давления под подошвой штампа шириной  $b$ ;

$S$  — осадка подошвы центрально нагруженного штампа, рассчитанная по модели Кулона-Мора.

Следует отметить, что при выполнении настоящей работы был рассмотрен только один аспект воздействия высоконапорного инъецирования или иного способа армирования на сжимаемость основания — влияние твердых включений. Влияние уплотнения грунта при внедрении этих включений в грунт — задача, требующая дополнительной проработки.

**Выводы. 1.** В условиях проведенных опытов сжимаемость рыхлого песчаного основания уменьшается в зависимости от степени его армиро-

вания (до 50 % от начального показателя сжимаемости, оцениваемого модулем  $E = 1,24$  МПа).

2. В случае оценки свойств усиленной зоны основания методами геокомпозитной среды интегральный модуль деформации увеличивается незначительно (в рассматриваемых условиях до 8 %).

3. При оценке влияния включений с применением модели основания в виде упругоидеально-пластической интегральный модуль деформации увеличивается несущественно (до 3 % от своего начального значения).

Значительные расхождения расчетов с экспериментом могут быть уменьшены при использовании более строгих методов нелинейной механики грунтов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. № 2119009 РФ. Способ уплотнения грунта [Текст] / А.В. Лубягин, В.С. Миронов ; Опубл. 1997 ; Бюл. № 8.
2. Тер-Мартиросян, З.Г. Механика грунтов [Текст] : Учеб. пособие / З.Г. Тер-Мартиросян. — М. : Изд-во Ассоциации строит. вузов, 2005. — 408 с.
3. Методика оценки прочности и сжимаемости крупнообломочных грунтов с пылеватым и глинистым заполнителем и пылеватых и глинистых грунтов с крупнообломочными включениями. ДальНИИС. — М. : Стройиздат, 1989. — 24 с.
4. Plaxis 2D. Finite Element Code for Soil and Rock Analyses / Руководство пользователя. Версия 8. — Нидерланды : Дельфтский технологический университет, 2002. — 334 с.

*ГРИШИН Дмитрий Викторович, инж.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено после доработки 13.10.11

**Grishin D.V.**, engineer, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

#### STAMP SETTLEMENT AFTER RESIZING THE AREA OF SAND GROUNG REINFORCEMENT

The experimentally determined degree of reduction of the compressibility of reinforced base, depending on the size of the zone of amplification. An estimate obtained by calculation methods using was significantly different from experimental data.

**Key words:** reinforced base, modules strain, experiment, calculation.

#### REFERENCES

1. Patent N 2119009. The Way of Soil Compressing. Priority of Invention [Text] / A.V. Lubyagin, V.S. Mironov ; Edited 27.01.1997 ; Bulletin N 8.
2. Ter-Martiroсян, З.Г. Soil Mechanics [Text] : Tutorial / З.Г. Тер-Мартиросян. — М. : Publishing House of the Association of Construction Universities, 2005. — 408 p.
3. Methods of Assessing the Strength and Compressibility of Coarse Soils With Silty Clay Filler and Silt and Clay Soils With Coarse-grained Inclusions. DalNIIS. — М. : Stroyizdat, 1989. — 24 p.
4. Plaxis. Finite Element Code for Soil and Rock Analyses / Instruction manual. Version 8. The Netherlands : Delft Technological University, 2002. — 334 p.

## **ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ<sup>1</sup>**

- 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<sup>2</sup> за подписью автора или руководителя представляющей статью организацией. 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 Сиг 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 (ставлять 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 иллюстраций 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 следуют 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 *l* (цифра), *n* и *p*, *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).

<sup>1</sup> С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

<sup>2</sup> 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(СИ).

**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](http://www.sibstrin.ru) и [www.izvuzstr.sibstrin.ru](http://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 присыпать 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.

ББК 38  
И 33  
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов  
СТРОИТЕЛЬСТВО**

**№ 11 (635) 2011**

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Т.П. Петроченко*  
Технический редактор *Н.М. Макаренко*  
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*  
Корректор *Г.И. Шведкина*