

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

№ 1 (625)
Январь 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.А. Попов, Ю.П. Правдивец,
В.Г. Себешев, И.Б. Соколов, Ю.А. Феофанов,
Е.М. Чернышов

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

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

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 14.02.11. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$.
Усл. печ. л. 11,03+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 36.

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2011

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

- Платонова С.В.** Напряженно-деформированное состояние ленточного щелевидного фундамента 3

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

- Немировский Ю.В., Янковский А.П.** Анализ результатов расчетов попечерного деформирования сплошной несущей колонны высотного здания с учетом работы компенсаторов при горизонтальных сейсмических колебаниях основания и прохождении поверхностных волн 10

- Миренков В.Е., Шутов В.А., Полуэктов В.А.** Идентификация свойств, геометрии ослаблений и граничных условий кусочно-однородных пластин 22

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

- Куликов В.А., Абдрахимов В.З., Ковков И.В.** Исследование пористой структуры керамзита на основе отходов флотации углеобогащения 31

- Котляр В.Д.** Неравнoplотность керамического черепка компрессионного пресования на основе опоковидных пород 38

- Столбоушкин А.Ю., Бердов Г.И.** Ресурсосберегающая комплексная переработка минерального

техногенного сырья в производстве строительных материалов	46
Афанасьев С.В., Кузьмин И.В. Композиционные огнезащитные материалы для металлоконструкций	54
САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА	
Самарин О.Д., Азивская С.С. Принципы расчета нестационарного теплового режима помещения, обслуживаемого автоматизированными системами обеспечения микроклимата	59
СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ	
Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Важенин С.В., Дроздов Н.М., Дюкарев А.И., Чичканов Р.В. Физико-математическая модель дроссельно-клапанного пневмоударного механизма	63
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Горшков Н.И., Краснов М.А. Сравнительная оценка устойчивости и несущей способности системы «штамп — основание» на основе расчетов МКЭ	70
Данилов А.М., Гарькина И.А. Методология проектирования сложных систем при разработке материалов специального назначения	80
Добрачев В.М., Вольф Я.В. Распределение напряжений в сталежелезобетонных перфорированных балках	86
Королев Д.Ю., Тертычный О.В., Семенов В.Н., Щукина Т.В. Фасадные краски нового поколения и температурный режим наружных ограждений при их применении	93
Швецов Г.И., Халтурин Л.В. Структурно-фазовая деформируемость лесовых грунтов в природных условиях и в основаниях зданий и сооружений	100
Юзиков В.П., Завьялова О.Б. Расчет тонкостенных стержней открытого профля с учетом сдвига срединной поверхности	108
В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ	
Логунова М.А., Пешков А.С. Экспериментальные исследования бетонных балок без организованных трещин и с заранее организованными трещинами	116
Носков И.В., Халтурин А.Ю. Методика и результаты полевых испытаний винтовых свай	121

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 624.131.542

С.В. ПЛАТОНОВА

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛЕНТОЧНОГО ЩЕЛЕВИДНОГО ФУНДАМЕНТА

Рассматривается упруго-пластическая модель основания двухщелевого ленточного фундамента. Оцениваются особенности напряженно-деформированного состояния основания при различных значениях механических характеристик последнего. Получены эпюры контактных давлений, необходимые для расчета прочности фундамента.

Ключевые слова: щелевидные фундаменты, пластичность грунта, прочность фундамента.

В расчетах использована модель упругоидеально-пластической бездилатационной среды [1]. Задача решена методом конечных элементов в перемещениях для условий плоской деформации. Расчетная область разделена на 426 треугольных элементов, объединенных 240 узлами; использована симметрия формы двухщелевого фундамента при поступательном смещении его в вертикальном направлении. Смещения фундамента задавались ступенями; для каждой ступени получены необходимые сведения о полном напряженном состоянии каждого треугольного элемента и смещениях узлов по вертикали и горизонтали. Построены графики осадок фундаментов на всем диапазоне возрастания внешней нагрузки. Двухщелевой фундамент имел ширину плиты $b = 0,7$ м, толщину стен $t_c = 0,14$ м, высоту стен $h_c = 0,6$ м, толщину плитной части $h_p = 0,1$ м. Анализ полученных результатов позволил выявить следующее.

Графики зависимости осадок фундамента от величины внешней нагрузки были криволинейными (рис. 1). Грунтовое основание с меньшим значением модуля деформации при прочих равных условиях получает, естественно, большие деформации, чем более жесткое основание. Двухщелевые ленточные фундаменты при прочих равных условиях получают осадки больше тех, какие возникают у ленточных щелевидных фундаментов с одной щелью.

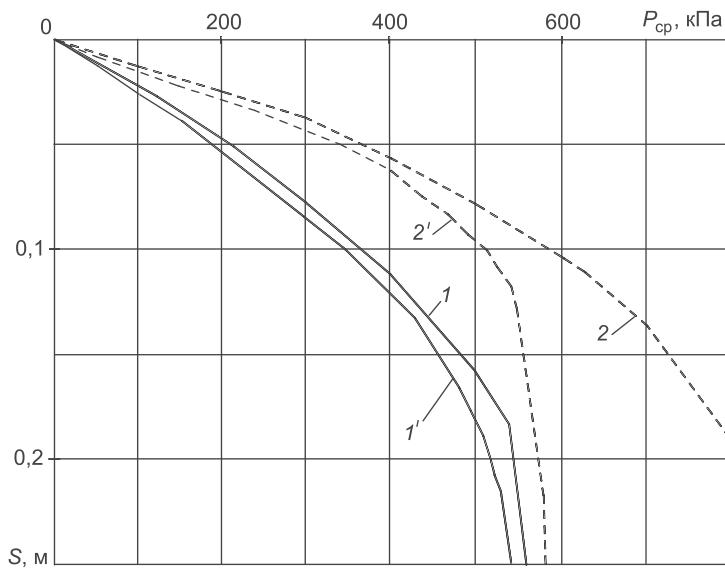
Рассматривалось напряженное состояние основания со следующими значениями характеристик грунтовой среды:

для грунта I $E = 5$ МПа, $v = 0,40$, $\phi = 15^\circ$, $c = 0,04$ МПа, $\gamma = 20$ кН/м³;

для грунта II $E = 10$ МПа, $v = 0,40$, $\phi = 15^\circ$, $c = 0,04$ МПа, $\gamma = 20$ кН/м³.

Здесь E , v , ϕ , c и γ — соответственно модуль деформации, коэффициент Пуассона, угол внутреннего трения, сцепление и удельный вес грунта.

Для основания, сложенного грунтами I и II, с фундаментом, заглубленным на величину $h = 0,6$ м, рассмотрены особенности напряженного состояния, соответствующие «малым» ($P_{\min} = 150$ кН/м²) и «большим» ($P_{\max} = 544$ кН/м²) нагрузкам. «Малые» нагрузки соответствовали на-



*Rис. 1. Графики осадок щелевидных фундаментов при их заглублении на 0,6 м
Кривые 1 и 2 — двухщелевидные фундаменты на грунтах I и II соответственно; 1' и 2' — однощелевидные фундаменты на грунтах I и II*

чальному загружению фундамента при отсутствии пластических деформаций в грунте, «большим» нагрузкам соответствовало наличие значительных смещений фундамента и появление в грунте пластических деформаций. Промежуточным значениям нагрузок на фундамент соответствовали эпюры, занимающие промежуточные очертания по сравнению с изображенными на рис. 2 и 3, где показаны значения напряжений без учета собственного веса грунта.

Проследим влияние величины модуля деформации E (см. рис. 2, «малая» нагрузка при прочих равных условиях) на особенности распределения напряжений в грунтовом основании. Главные максимальные напряжения $\bar{\sigma}_1 = \sigma_1 / P_{cp}$ по решению нелинейной задачи (грунт I, рис. 2, «малая» нагрузка) увеличиваются до глубины $z/b = 0,75$, а затем их значения плавно уменьшаются. Минимальные главные напряжения $\bar{\sigma}_3 = \sigma_3 / P_{cp}$ до глубины $z/b = 1,65$ постепенно уменьшаются, а затем несколько увеличиваются.

Очертания эпюр $\bar{\sigma}_1$ (грунт I, рис. 2, «большая» нагрузка) аналогичны отмеченным для «малой» нагрузки; количественные различия, наблюдающиеся в очертаниях одноименных эпюр, с глубиной нивелируются. Значения напряжений $\bar{\sigma}_3$ до глубины $z/b \approx 3$ уменьшаются, затем — плавно увеличиваются.

В более жестком грунтовом основании (грунт II, рис. 2) при «малой» и «большой» нагрузках на фундамент относительные значения одноименных напряжений $\bar{\sigma}_1$ или $\bar{\sigma}_3$ аналогичны описанным для грунта I.

В контактном слое даже при «малых» ступенях нагрузки из-за различной податливости грунтового сердечника и стенок фундамента напряжения $\bar{\sigma}_1$ и $\bar{\sigma}_3$ распределяются неравномерно: наблюдаются концентрация напряжений под подошвой стенок и деконцентрация — под подошвой грунтовых сердечников. В контактном слое грунта на уровне подошвы стенок величина модуля деформации, как видим (см. рис. 3), слабо отражается на характере распределения напряжений.

Оценим особенности распределения относительных нормальных σ_x / P_{cp} , (σ'_x / P_{cp}) , σ_z / P_{cp} , (σ'_z / P_{cp}) и касательных τ_{xz} / P_{cp} , (τ'_{xz} / P_{cp}) контактных напряжений по поверхности щелевидного фундамента при «малых» и «больших» P_{cp} нагрузках, принятых в расчете. Значения напряжений на рис. 4 представлены в долях от нагрузки P_{cp} . Напряжения определялись по известным зависимостям:

$$\sigma_z = \sigma_1 \cos^2 \alpha' + \sigma_3 \sin^2 \alpha,$$

$$\sigma_x = \sigma_1 \sin^2 \alpha' + \sigma_3 \cos^2 \alpha,$$

$$\tau_{xz} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin^2 \alpha,$$

где σ_1 , σ_3 — главные напряжения; σ_z , σ_x , τ_{xz} — нормальные вертикальные, горизонтальные и касательные напряжения по вертикальным и горизонтальным площадкам соответственно; α — угол наклона главных напряжений σ_1 к вертикали (ось z).

Как видно (рис. 4, а, б), нормальные напряжения σ'_z / P_{cp} под подошвами внутренней и наружной стенок неодинаковы. Это наблюдается в основаниях, сложенных обоими видами грунта — I и II. Относительные значения напряжений под подошвой внутренней стенки фундамента при «малых» нагрузках меньше, чем под подошвой наружной стенки, аналогичная зависимость наблюдается и при «больших» нагрузках.

По боковым граням стенок (рис. 4, грунт I, «малая» нагрузка) распределение нормальных и касательных напряжений достаточно неравномерно. И боковые σ_x / P_{cp} и касательные τ_{xz} / P_{cp} напряжения составляют заметную долю от величины внешней нагрузки на фундамент. Ординаты эпюров напряжений σ_x / P_{cp} с глубиной уменьшаются. Значения напряжений σ'_x / P_{cp} по внутренней грани стенки распределяются равномерно. Относительные значения касательных напряжений τ_{xz} / P_{cp} аналогичны описанным выше для напряжений σ_x / P_{cp} . Напряжения τ'_{xz} / P_{cp} по внутренней грани стенки практически отсутствуют.

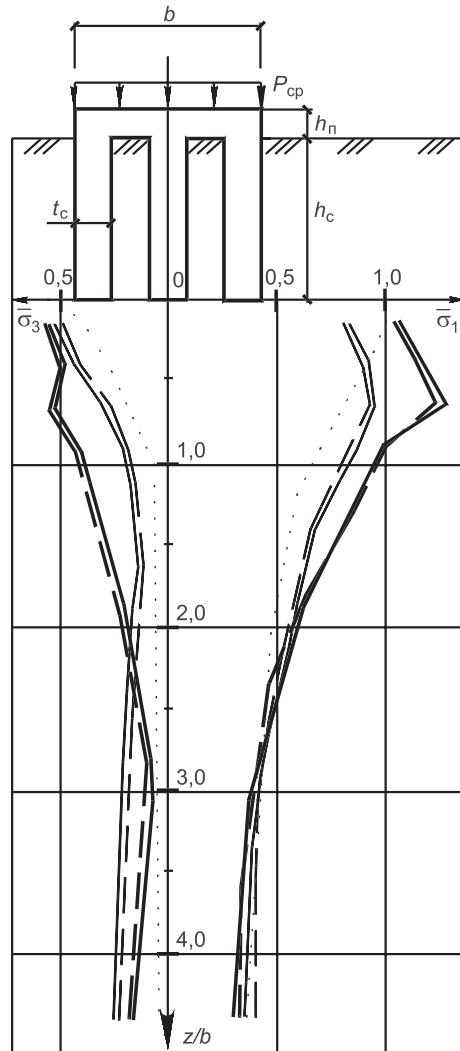


Рис. 2. Распределение напряжений $\bar{\sigma}_1$ и $\bar{\sigma}_3$ вдоль центральной вертикали двухщелевидных фундаментов
грунт I: ----- «малая» нагрузка, - - - «большая» нагрузка; грунт II: —— «малая» нагрузка,
— «большая» нагрузка

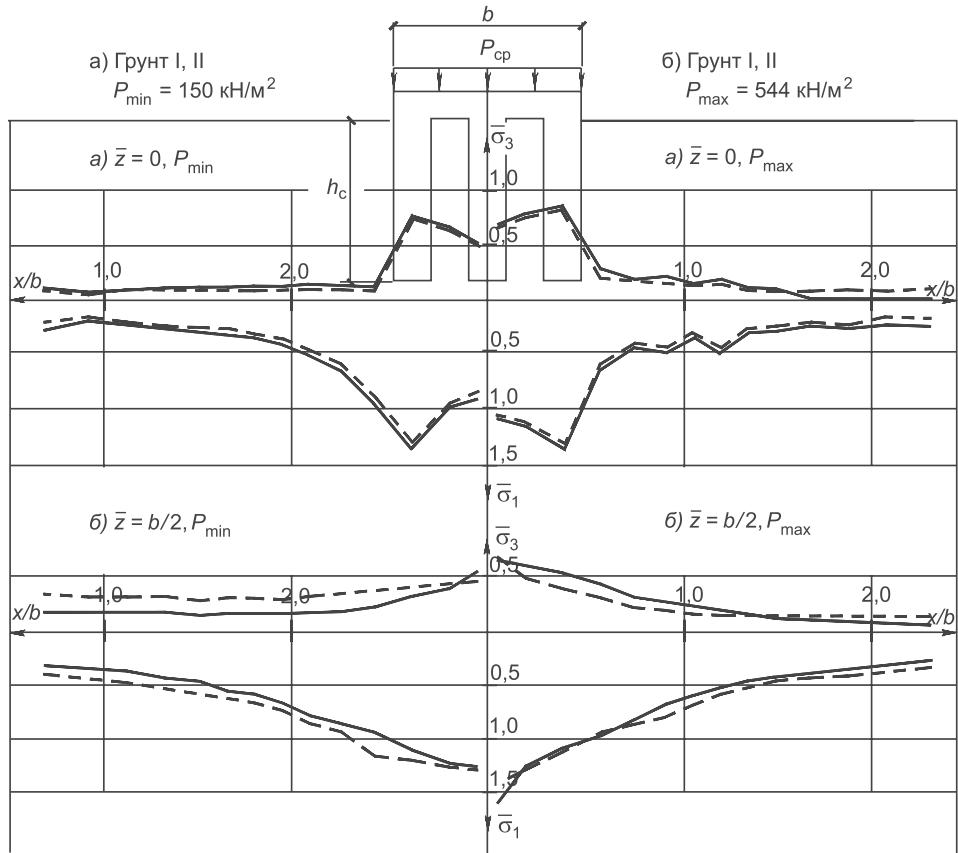


Рис. 3. Распределение напряжений $\bar{\sigma}_1$ и $\bar{\sigma}_3$ на глубинах $z/b = 0$ и $z/b = 0,5$
грунт I: - - - «малая» нагрузка, - - - «большая» нагрузка; грунт II: — «малая» нагрузка,
— «большая» нагрузка

Очертания эпюров по контакту фундамента с более жестким грунтовым основанием (рис. 4, грунт II, «малая» нагрузка) подобны описанным выше.

Расчет усилий в опасных сечениях фундамента возможен лишь тогда, когда установлен характер реактивных давлений грунта по контактным поверхностям. Реактивные давления, действующие на фундамент, будут вычислены наиболее надежно лишь при использовании методов расчета, учитывающих особенности работы грунтового основания, в данном случае — пластические деформации в области под подошвой стенок двухщелевого ленточного фундамента. Для устранения возможных ошибок, вытекающих из пренебрежения влиянием пластических деформаций в рассматриваемом конкретном случае, нами выполнены соответствующие расчеты напряженного состояния грунтового основания щелевидного фундамента с использованием модели упругоидеально-пластической среды. При проектировании фундаментов любого типа должна быть обеспечена их прочность при действии изгибающих моментов и перерезывающих сил в опасных сечениях.

Форма полученных эпюр напряжений позволяет сделать вывод о местоположении опасных сечений — где внутренняя стенка примыкает к плите фундамента (сечение 1–1, рис. 4) и в верхней части внешней стены фундамента (сечение 2–2).

Полученные графики распределения напряжений по контактной поверхности фундамента позволили вычислить значения внутренних усилий

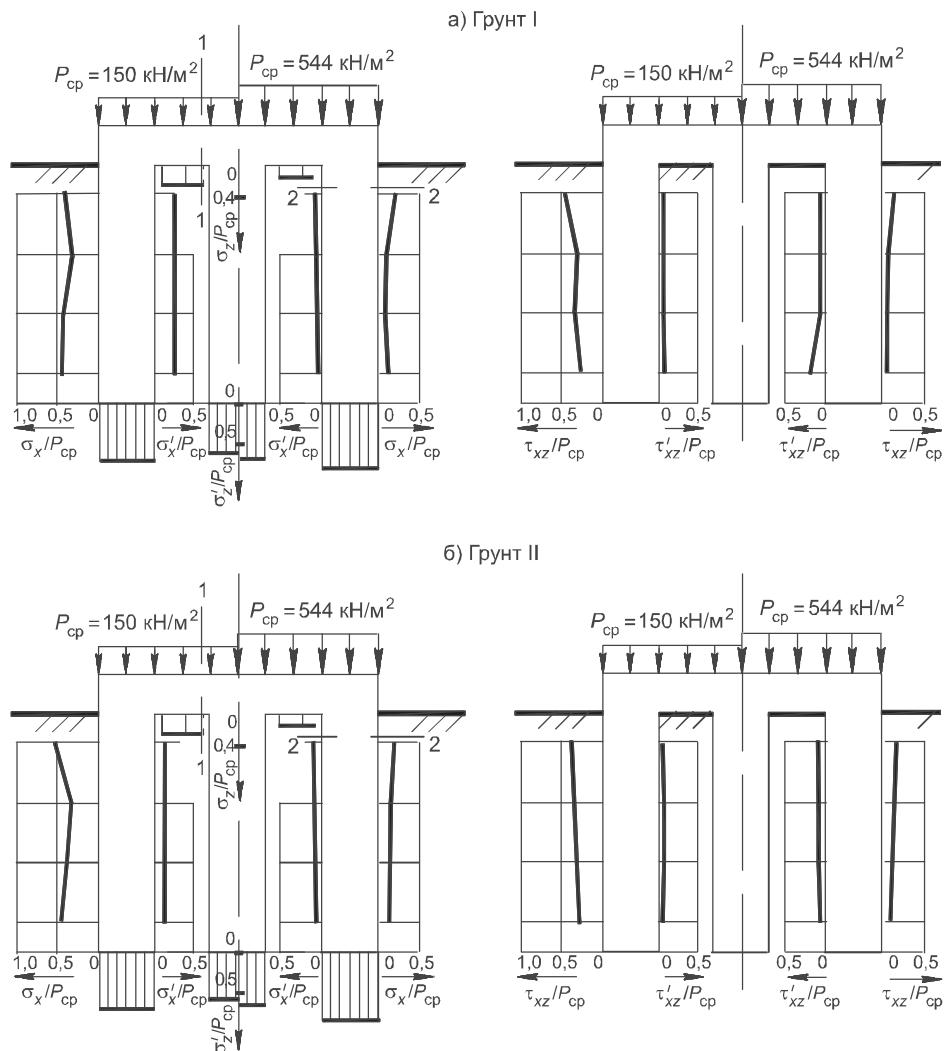


Рис. 4. Распределение контактных напряжений:

а) для грунта I: $E = 5 \text{ МПа}$, $\phi = 15^\circ$, $c = 0,04 \text{ МПа}$; б) для грунта II: $E = 10 \text{ МПа}$, $\phi = 15^\circ$, $c = 0,04 \text{ МПа}$

лий (изгибающие моменты M_{1-1} и M_{2-2} в опасных сечениях фундамента) и оценить его прочность при грунтовых условиях, различающихся величиной деформационной характеристики:

$$M_{1-1} = \frac{-(\sigma_{xcp} - \sigma'_{xcp})h_c(h_c + h_n)}{2} - \frac{P_{cp}(b - t_c)^2}{8} + \frac{\sigma_z(b - 3t_c)^2}{8} + \frac{\sigma'_z t_c(b - 2t_c)}{2} + \frac{|\tau_{xz}|h_c(b - t_c)}{2} + \frac{|\tau'_{xz}|h_c(b - 3t_c)}{2},$$

$$M_{2-2} = - \sum_{i=1}^4 [(i - 0,5)(\sigma_{xi} - \sigma'_{xi})L^2].$$

Необходимость армирования бетонного фундамента в сечении 1–1 установлена сопоставлением действующих изгибающих моментов и предельного сопротивления бетона изгибу M'_{ULT} в этих сечениях (табл. 1). Последнее зависит от класса бетона и оценивается величиной [3]

Таблица 1
Предельные усилия, воспринимаемые
бетоном фундамента

Показатель	Класс бетона			
	В 15	В 20	В 30	В 40
R_{bt} , МПа	0,75	0,90	1,15	1,40
M_{ULT} , кНм	1,26 2,46	1,83 2,96	1,95 3,80	2,38 4,62
R_b , МПа	8,50	11,50	17,00	22,00
Q , кН/м	254 356	346 482	510 710	660 920

Примечание. В числителе — предельные усилия в плите ($h = 0,1$ м), в знаменателе — в стене ($h = 0,14$ м).

приведены значения расчетных изгибающих 2–2 при некоторых величинах внешней нагрузки P_{cp} и соответствующих значениях механических характеристик грунта основания. Здесь отрицательные моменты соответствуют растяжению наружных волокон расчетных сечений фундамента, что при полном сцеплении кирпичной кладки с фундаментом для конструкции полностью безопасны (заметим, что появление таких моментов при рассматриваемых граничных условиях кинематически невозможно); A_s — потребное сечение арматуры.

Таблица 2

Внутренние усилия (M , Q) в опасных сечениях фундамента

$E = 5$ МПа, $\phi = 15^\circ$, $c = 40$ кПа				
Изгибающий момент	$P_{cp} = 150$ кН / м ²	A_s , см ²	$P_{cp} = 150$ кН / м ²	A_s , см ²
M_{1-1} , кНм	2,20 1,50	0 0	-0,10 4,00	0 0,12
M_{2-2} , кНм	6,40	0,19	6,20	0,19
Q_{1-1} , кН/м	14,00		48,00	
Q_{2-2} , кН/м	34,60		15,70	

Примечание. Значения M_{1-1} в знаменателях дробей и значения M_{2-2} вычислены без учета влияния контактных давлений с наружной стороны стен фундамента.

В сечении 1–1 и 2–2 расчетные значения моментов получаются завышенными, кроме того, завышение напряжений σ_x вызывает растяжение наружных волокон сечений. Этот результат оценивается нами критически, причины его вызваны завышенными расчетом давлениями, действующими на наружную боковую грань стенки. Как показали опыты В.Е. Иванова [4], в этом случае контактные давления, действующие на стенки сердечника, существенно превышают контактные давления с противоположной стороны стенки, так что расчеты контактных давлений следует проводить с иными граничными условиями, при которых давления σ_x и τ_{zx} на стенки с внешней стороны должны отсутствовать. При этих условиях значения внутренних усилий в сечениях 1–1 и 2–2 заметно изменяются (табл. 2).

Поперечные силы Q в расчетных сечениях (1–1 и 2–2), как видно из табл. 1 и 2, значительно меньше предельных значений Q_{ULT} , установленных расчетом по действующим нормам [3].

Выводы. 1. Полученные расчетом графики осадок двухщелевого фундамента имеют криволинейные очертания: сказывается существен-

$$M_{ULT} = R_{bt} W,$$

где R_{bt} — расчетное сопротивление бетона при осевом растяжении;
 W — момент сопротивления сечения.

Потребность в армировании при значениях нагрузки, превышающих максимально допустимые по прочности бетона, легко устанавливается по существующим правилам расчета железобетонных конструкций с одиночной арматурой [3]. В табл. 2, например, моментов в сечениях 1–1 и

2–2 при некоторых величинах внешней нагрузки P_{cp} и соответствующих значениях механических характеристик грунта основания. Здесь отрицательные моменты соответствуют растяжению наружных волокон расчетных сечений фундамента, что при полном сцеплении кирпичной кладки с фундаментом для конструкции полностью безопасны (заметим, что появление таких моментов при рассматриваемых граничных условиях кинематически невозможно); A_s — потребное сечение арматуры.

Таблица 2

Внутренние усилия (M , Q) в опасных сечениях фундамента

$E = 5$ МПа, $\phi = 15^\circ$, $c = 40$ кПа				
Изгибающий момент	$P_{cp} = 150$ кН / м ²	A_s , см ²	$P_{cp} = 150$ кН / м ²	A_s , см ²
M_{1-1} , кНм	2,20 1,50	0 0	-0,10 4,00	0 0,12
M_{2-2} , кНм	6,40	0,19	6,20	0,19
Q_{1-1} , кН/м	14,00		48,00	
Q_{2-2} , кН/м	34,60		15,70	

Примечание. Значения M_{1-1} в знаменателях дробей и значения M_{2-2} вычислены без учета влияния контактных давлений с наружной стороны стен фундамента.

В сечении 1–1 и 2–2 расчетные значения моментов получаются завышенными, кроме того, завышение напряжений σ_x вызывает растяжение наружных волокон сечений. Этот результат оценивается нами критически, причины его вызваны завышенными расчетом давлениями, действующими на наружную боковую грань стенки. Как показали опыты В.Е. Иванова [4], в этом случае контактные давления, действующие на стенки сердечника, существенно превышают контактные давления с противоположной стороны стенки, так что расчеты контактных давлений следует проводить с иными граничными условиями, при которых давления σ_x и τ_{zx} на стенки с внешней стороны должны отсутствовать. При этих условиях значения внутренних усилий в сечениях 1–1 и 2–2 заметно изменяются (табл. 2).

Поперечные силы Q в расчетных сечениях (1–1 и 2–2), как видно из табл. 1 и 2, значительно меньше предельных значений Q_{ULT} , установленных расчетом по действующим нормам [3].

Выводы. 1. Полученные расчетом графики осадок двухщелевого фундамента имеют криволинейные очертания: сказывается существен-

ное влияние пластических деформаций в рассмотренном пылевато-глинистом грунте.

2. Влияние величины модуля деформации (в пределах рассмотренных значений) на относительные нормальные напряжения вдоль центральной вертикали и на некоторой глубине — по горизонтали практически одинаково.

3. При наличии в двухщелевом фундаменте внутренней стенки нормальные и касательные напряжения внутри грунтовых сердечников носят равномерный характер ввиду однородности напряженного состояния грунта.

4. Распределение относительных нормальных и касательных контактных напряжений у двухщелевого ленточного фундамента, расположенного на грунтовом основании с различными деформационными характеристиками, при прочих равных условиях в качественном и количественном отношении отличаются незначительно.

5. При устройстве монолитных двухщелевых фундаментов их армирование в ряде случаев не требуется. Для сборно-монолитных и сборных фундаментов может потребоваться армирование; количество арматуры устанавливается расчетом с использованием приведенных данных или путем дополнительных расчетов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике [Текст] / А.Б. Фадеев. — М. : Недра, 1987. — 224 с.
2. СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений [Текст]. — М. : Стройиздат, 1985. — 40 с.
3. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры [Текст]. — М. : Госстрой РФ, 2005. — 54 с.
4. Иванов, В.Е. Экспериментальное исследование работы грунтового основания коробчатого фундамента при действии вертикальных нагрузок [Текст] / В.Е. Иванов, А.П. Криворотов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1969. — № 7 — С. 31–35.

ПЛАТОНОВА С.В., канд. техн. наук, доц.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

Получено после доработки 08.12.10

Platonova S.V., candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: forsnesha@yahoo.com, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

STRESS-STRAIN DISTRIBUTION GROUND UNDER SLIT STRIP FOUNDATION

The article presents the plastics model base two slip strip foundation. Value peculiarity has stress-strain state foundation for different mechanical characters.

The results epures has contact pressure necessity for calculation foundation durable.

Key words: slit strip foundation, ground of plastic, durable.

REFERENCES

1. Fadеev, A.B. Method of finite elements in geomechanics [Text] / A.B. Fadеev. — M. : Bowels, 1987. — 224 p.
2. SNiP 2.02.01-83*. The bases of buildings and constructions [Text]. — M. : Stroyizdat, 1985. — 40 p.
3. SP 52-101-2003. Concrete and ferroconcrete constructions [Text]. — M. : Stroyizdat, 2005. — 54 p.
4. Ivanov, V.E. Experimental research of work of the soil basis of the box-shaped base at action of vertical loadings [Text] / V.E. Ivanov, A.P. Krivorotov // News of Higher Educational Institutions. Construction and Architerture. — 1969. — N 7. — C. 31–35.

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 539.3

Ю.В. НЕМИРОВСКИЙ, А.П. ЯНКОВСКИЙ

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ ПОПЕРЕЧНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СПЛОШНОЙ НЕСУЩЕЙ КОЛОННЫ ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ С УЧЕТОМ РАБОТЫ КОМПЕНСАТОРОВ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ ОСНОВАНИЯ И ПРОХОЖДЕНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН*

Проведен анализ решений динамического поведения несущих стальных колонн высотных зданий при горизонтальных сейсмических колебаниях грунта и прохождении поверхностных волн типа рэлеевских с учетом работы компенсаторов, сопротивляющихся повороту сечений стоек. Построены амплитудно-частотные характеристики сплошных колонн четырех типов и объяснены особенности поведения этих характеристик. Показано, что равнопрочные в естественном состоянии эксплуатации колонны не всегда позволяют сэкономить их материал по сравнению с эталонными колоннами постоянного поперечного сечения и при динамических (сейсмических) воздействиях такие колонны не гарантируют высокой эффективности работы по сравнению с эталонными конструкциями.

Ключевые слова: сейсмическое воздействие, несущая колонна, высотное здание, динамическое деформирование, устойчивость, компенсаторы.

Настоящая работа продолжает исследования, опубликованные в [1, 2], где была сформулирована начально-краевая задача расчета динамического поведения несущей колонны высотного здания при горизонтальных сейсмических колебаниях основания и прохождении поверхностных волн типа рэлеевских [1] и разработан эффективный численный метод ее интегрирования [2]. Обсудим результаты расчетов, проведенных на основе разработанного в [2] метода для сплошных стоек постоянного и переменного поперечного сечения с учетом работы компенсаторов, сопротивляющихся поворотам поперечных сечений колонн в местах прикрепления сосредоточенных масс (рис. 1), моделирующих влияние межэтажных перекрытий, которые, по предположению [1], имеют большие моменты инерции относительно точек опирания на колонны, поэтому возможное вращение этих перекрытий не учитывается.

Рассматриваются несущие колонны (стойки) из стали С440 [3] с модулем упругости $E = 205$ ГПа, пределом упругого сопротивления $R = 400$ МПа и объемной плотностью $\rho = 7800$ кг/м³.

Исследуется динамическое поведение четырех типов колонн.

* Работа выполнена в рамках программы Министерства образования и науки РФ (номер проекта 2.1.2/4822).

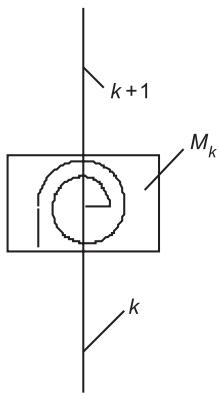


Рис. 1. Расчетная схема закрепления концов k - и $(k + 1)$ -го элементов сплошной стойки на M_k -й сосредоточенной массе

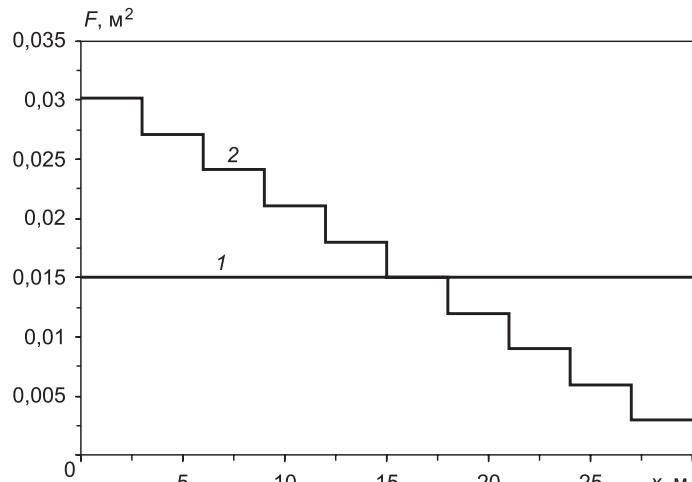


Рис. 2. Зависимости площадей поперечных сечений несущих колонн десятиэтажного здания от осевой координаты

Первый тип колонны. Стойка высотой $L = 30$ м имеет поперечное сечение кольцевой формы с отношением внутреннего радиуса к внешнему, равным 0,7. Площадь поперечного сечения $F = 150 \text{ см}^2$, масса стойки $M = \rho L F = 3528,9$ кг. Нижний конец стойки упирается в опорную плиту и жестко заделан в ней¹, через каждые 3 м к колонне присоединены 10 сосредоточенных масс $M_k = 30$ т ($1 \leq k \leq K = 10$), моделирующих влияние межэтажных перекрытий десятиэтажного здания (см. рис. 1 и [1]).

В естественных (статических) условиях эксплуатации наибольшие сжимающие напряжения в такой колонне возникают в нижнем поперечном сечении и равны:

$$|\sigma_{\max}| = g \left(M + \sum_{k=1}^K M_k \right) / F, \quad (1)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения;

K — количество сосредоточенных масс.

Используя (1), определим условный коэффициент запаса статической прочности рассматриваемой колонны (без учета возможной потери устойчивости)

$$n_1 = R / |\sigma_{\max}| = 1,9898. \quad (2)$$

Это значение n_1 попадает в интервал $1,5 \leq n_{\text{ст}} \leq 2,5$ значений коэффициента запаса статической прочности, используемых на практике при проектировании металлоконструкций [3].

Второй тип колонны. Стойка высотой $L = 30$ м представляет собой равнопрочную колонну с условным коэффициентом запаса статической прочности

$$n_2 = R / |\sigma_{\max}| = 4. \quad (3)$$

(Выбор значения (3) будет обоснован ниже.) Нижний конец стойки по-прежнему упирается в опорную плиту и жестко заделан в ней. Поперечные сечения имеют кольцевую форму с прежним отношением внут-

¹ Лихтарников Я.М., Клыков В.М. Расчет стальных конструкций: Справ. пособие. Киев: Будівельник, 1984. 368 с.

ренного радиуса к внешнему. График зависимости площади поперечного сечения $F(x)$ (x — осевая координата стойки, отсчитываемая от ее нижнего конца) с прежним распределением присоединенных масс изображен на рис. 2 ломаной 2. (Прямая линия 1 приведена для сравнения и характеризует площади поперечных сечений для колонны первого типа.) Согласно [4], площадь поперечного сечения равнопрочной стойки между соседними сосредоточенными массами должна изменяться по экспоненциальному закону. Как видно из рис. 2, экспоненциальное изменение площади сечения между сосредоточенными массами для случая рассматриваемого материала колонны пренебрежимо мало (около 0,1 %), поэтому с практической точки зрения рациональное распределение площади поперечного сечения колонны можно считать кусочно-постоянной (ступенчатой) функцией. Масса такой равнопрочной стойки $M = 3892,6$ кг, т.е. на 10,3 % больше массы эталонной колонны первого типа.

Третий тип колонны. Эта стойка полностью совпадает с колонной первого типа, но нижний ее конец шарнирно закреплен на опорной плите, на которой может быть установлен компенсатор, сопротивляющийся повороту корневого сечения стойки. (Расчетная схема такого компенсатора подобна изображенной на рис. 2, б в [1].)

Четвертый тип колонны. Эта стойка полностью совпадает с колонной второго типа, но имеет особенность опирания такую же, как стойка третьего типа.

Поведение колонн исследуется с учетом их гибкости. Предварительные расчеты, проведенные авторами, показывают, что результаты, полученные в двух постановках: 1) в предположении относительно большой жесткости колонн и 2) с учетом их гибкости — существенно различаются.

Предполагается, что при прохождении горизонтальных сейсмических волн корневое сечение колонны не поворачивается ($\Theta_z(t) \equiv 0$; см. рис. 1 в [1]), а опорная плита колеблется в горизонтальном направлении по закону

$$V(t) = \begin{cases} 0, & -\infty < t < t_0 = 0, \\ V_a \sin(\pi t / T) \sin(2\pi v t), & t_0 = 0 \leq t \leq T = 10 / v > 0, \\ 0, & T < t < +\infty, \end{cases} \quad (4)$$

т.е. до начала колебаний ($t < t_0 = 0$) колонна находится в естественном (статически нагруженном) состоянии; затем при $0 \leq t \leq T$ основание колонны колеблется по синусоидальному закону $\sin(2\pi v t)$ с частотой v и переменной амплитудой $V_a \sin(\pi t / T)$ в течение времени T , равном десяти периодам колебаний синусоиды $\sin(2\pi v t)$. После прохождения сейсмической волны при $t > T$ основание колонны остается неподвижным (остальные сечения колонны ($x > 0$) продолжают движение в силу возникших инерционных сил). График функции (4) при $v = 0,1$ Гц и $V_a = 0,01$ м изображен на рис. 3.

При прохождении поверхностных волн типа рэлеевских опорная плита может поворачиваться на угол $\Theta_z(t)$ без горизонтального смещения ($V(t) \equiv 0$). В этом случае принимается закон изменения

$$\Theta_z(t) = \begin{cases} 0, & -\infty < t < t_0 = 0, \\ \Theta_{za} \sin(\pi t / T) \sin(2\pi v t), & t_0 = 0 \leq t \leq T = 10 / v > 0, \\ 0, & T < t < +\infty, \end{cases} \quad (5)$$

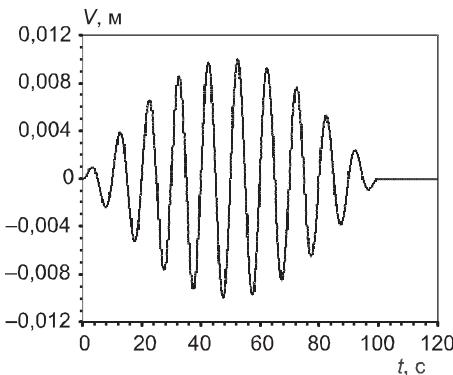


Рис. 3. Форма сейсмического воздействия

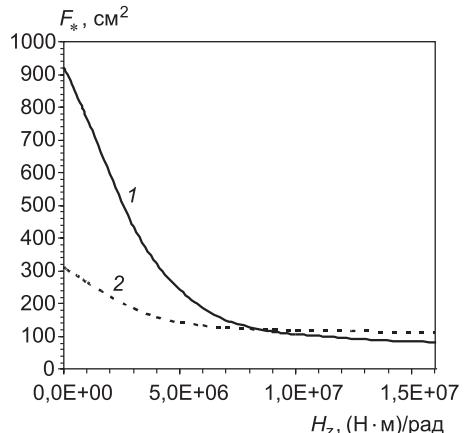


Рис. 4. Зависимости критических площадей сплошных колонн постоянного поперечного сечения от жесткостей компенсаторов

подобный (4). Могут быть заданы и другие законы движения основания колонны, отличные от (4), (5), а также возможно и совместное действие сейсмических воздействий типа (4), (5); в рамках разработанного в [2] метода расчета это не принципиально.

Прежде всего, исследуем проблему устойчивости (в смысле Ляпунова) рассматриваемых колонн. Так как сосредоточенные массы изначально заданы, то при заданной форме поперечного сечения стойки (кольцевой) в качестве критического параметра выступает площадь поперечного сечения. Очевидно, что критическая площадь F_* будет зависеть от жесткости компенсаторов $H_z^{(k)}$ (см. формулу (14) в [1]), расположенных на k -м межэтажном перекрытии.

В настоящем исследовании предполагаем, что все компенсаторы имеют одну и ту же жесткость (хотя это не обязательно), т.е. $H_z^{(k)} = H_z$ ($1 \leq k \leq K$). На рис. 4 кривая 1 характеризует указанную зависимость $F_*(H_z)$ для колонны первого типа. При разных значениях H_z такая стойка теряет устойчивость по разным формам. Так, на рис. 5 кривая 1 соответствует значению критической площади F_* при $H_z = 10^5$ (Н · м) / рад (такая же форма потери устойчивости имеет место и при отсутствии компенсаторов, т.е. $H_z = 0$), а линия 2 — значению F_* при $H_z = 10^7$ (Н · м) / рад. В последнем случае колонна первого типа теряет устойчивость локально (в окрестности опорной плиты). Расчеты показали, что при малых площадях поперечных сечений ($F \ll F_*(H_z)$) колонны всех типов теряют устойчивость, «складываясь» в форме гармошки.

В равнопрочных колоннах величина площади поперечного сечения определяется коэффициентом запаса n (см. равенство (3)), поэтому в качестве критического параметра целесообразно использовать именно коэффициент n , который, естественно, будет зависеть от жесткости компенсаторов. На рис. 6 кривая 1 характеризует зависимость $n_*(H_z)$ для колонны второго типа (здесь n_* — критическое значение n). При разных значениях H_z такая стойка теряет устойчивость также по разным формам. На рис. 5 кривая 1' соответствует критическому значению n_* при $H_z = 10^5$ (Н · м) / рад (качественно подобная форма потери устойчивости имеет место и при отсутствии компенсаторов, т.е. $H_z = 0$), а кривая 2' — значению n_* при $H_z = 10^7$ (Н · м) / рад. В последнем случае колонна второго типа теряет устойчивость локально на участке между предпоследней ($k = K - 1$) и последней ($k = K$) сосредоточенными массами.

Поведение кривых 1 на рис. 4 и 6 показывает, что в диапазоне $0 \leq H_z \leq 10^7$ (Н · м) / рад критические значения F_* и n_* существенно зависят от H_z , а при $H_z > 10^7$ (Н · м) / рад величины F_* и n_* почти не зависят от H_z . Учитывая это обстоятельство, далее в расчетах примем $H_z = 10^7$ (Н · м) / рад. Кроме того, для обеспечения устойчивого динамического поведения стойки при сейсмических воздействиях для колонны первого типа нужно задать $F > F_*(H_z)$, а для колонны второго типа — $n > n_*(H_z)$, где $H_z = 10^7$ (Н · м) / рад. Исходя из этих соображений для стойки первого типа площадь поперечного сечения F была задана равной 150 см². При этом, согласно кривой 1 на рис. 4, имеем $F/F_* = 1,4$ и коэффициент запаса $n = n_1$ (см. (2)), а для колонны второго типа коэффициент запаса n_2 был выбран в (3) равным 4. При этом, согласно линии 1 на рис. 6, имеем $n_2/n_* = 1,25$.

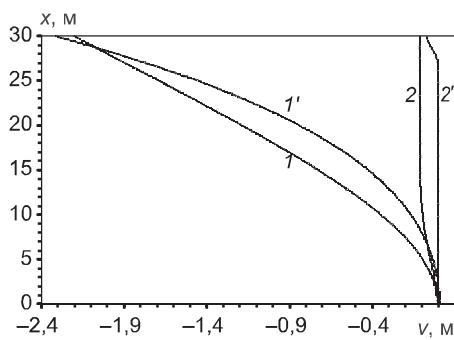


Рис. 5. Формы потери устойчивости несущих колонн с жестким защемлением на опорной плите

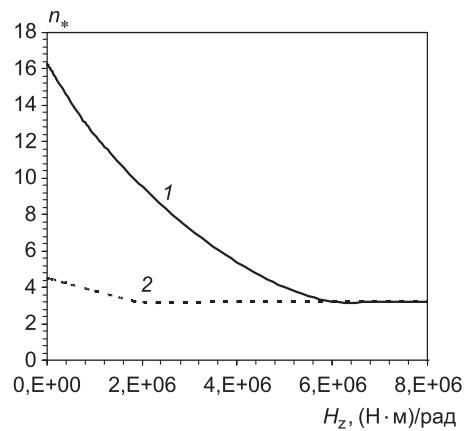


Рис. 6. Зависимости критических коэффициентов запаса сплошных равнопрочных колонн от жесткостей компенсаторов

Именно проблема устойчивости не позволяет при $H_z = 10^7$ (Н · м) / рад для равнопрочной стойки второго типа выбрать такой же коэффициент запаса n_2 , как и для колонны первого типа ($n_2 = n_1$), и тем самым существенно сэкономить расход ее материала.

Построим амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) $V_m(v)$, $\Theta_{zm}(v)$ колонн рассматриваемых двух типов, понимая под $V_m(v)$, $\Theta_{zm}(v)$ такие значения амплитуд V_a , Θ_{za} в (4), (5) при заданной частоте v , при которых в колонне возникают начальные пластические деформации, т.е.

$$V_m(v): \max_{x \in G, t \geq t_0} |\sigma(x, t; v)| = R,$$

$$\Theta_{zm}(v): \max_{x \in G, t \geq t_0} |\sigma(x, t; v)| = R, \quad (6)$$

где $x = \{x, y, z\}$; $G: 0 \leq x \leq L, (y, z) \in F(x)$.

Если в естественном состоянии эксплуатации наиболее нагруженным сечением колонны является ее основание ($x = 0$), то в динамическом состоянии начальная пластическая деформация может возникнуть и в других сечениях колонны ($0 < x \leq L$).

На рис. 7 изображены АЧХ рассматриваемых колонн при низких частотах v горизонтальных (рис. 7, а) и угловых (рис. 7, б) колебаний опор-

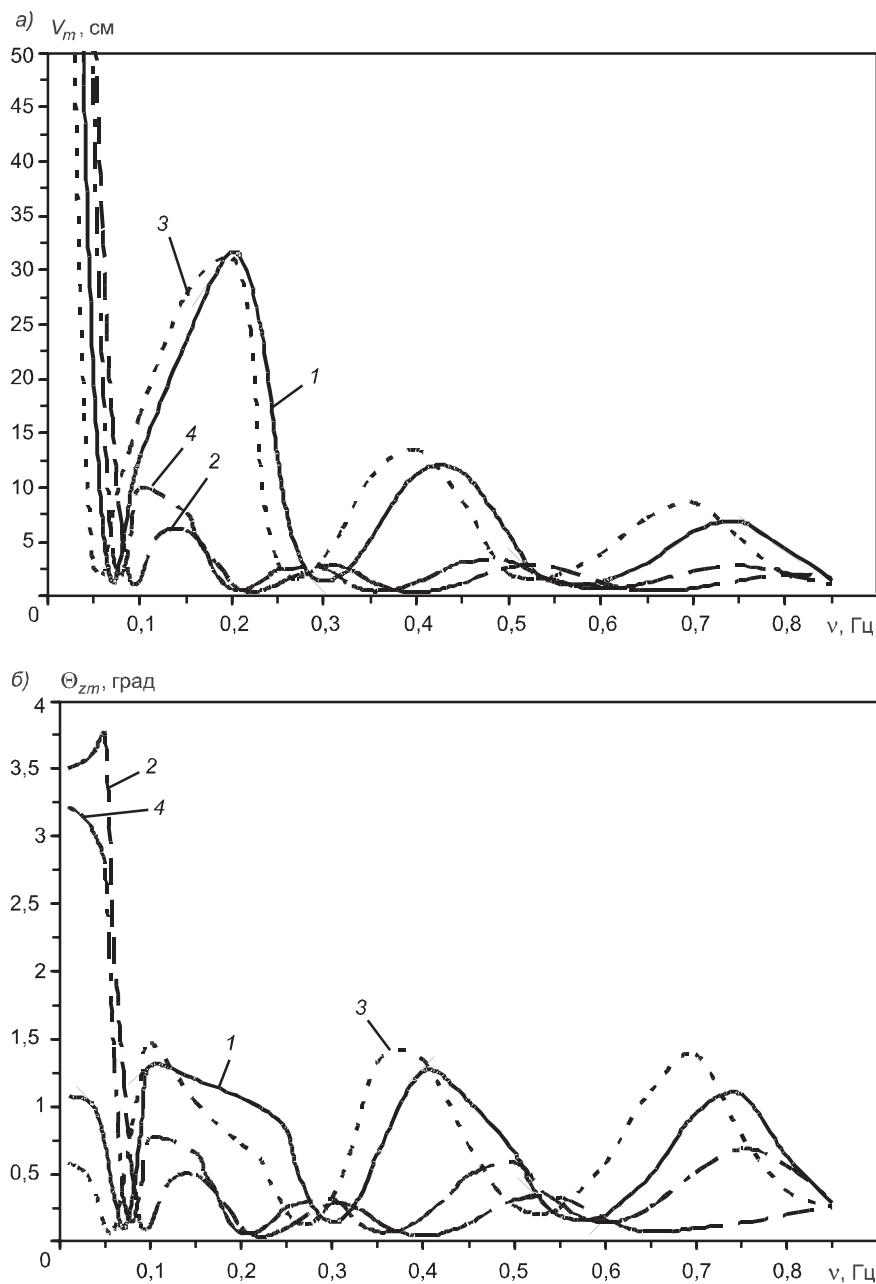


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики несущих колонн при горизонтальных (а) и угловых (б) колебаниях опорной плиты

ной плиты (в последнем случае — при прохождении поверхностных волн типа рэлеевских). Номера кривых на этом рисунке соответствуют номерам типов исследуемых колонн.

З а м е ч а н и е. При расчетах динамического поведения стоек использовались стержневые элементы высокого порядка [2] длиной $l = 3$ м, т.е. в расчетах использовалось всего 10 элементов. Увеличение количества элементов в 6 раз приводит к уточнению значений $V_m(v)$, $\Theta_{zm}(v)$ на величины порядка 0,5 %, что свидетельствует о хорошей точности расчета даже при весьма грубой разбивке колонны на единые элементы между сосредоточенными массами. Такая точность обеспечивается использованием аппроксимации прогибов $v(x)$ в элементе полиномами Эрмита пятого порядка [2].

Поведение кривых на рис. 7, а показывает, что при уменьшении частоты горизонтальных колебаний основания до нуля предельно допустимые амплитуды V_m таких колебаний (6) неограниченно возрастают ($V_m(v) \rightarrow \infty$ при $v \rightarrow 0$), т.е. чем плавнее в горизонтальном направлении колеблется основание, тем безопаснее динамическое состояние колонны, переходящее в пределе $v \rightarrow 0$ в квазистатическое. Согласно рис. 7, б, подобное поведение колонны при $v \rightarrow 0$ не наблюдается в случае угловых колебаний опорной плиты.

Все кривые на рис. 7 имеют локальные минимумы, которые соответствуют резонансным частотам колонны (v_p). Движение верхней массы для колонны первого типа при нижней резонансной частоте $v_p = 0,07$ Гц и $V_a = 1$ см изображено на рис. 8. Качественно подобные колебания получаются и для колонн других типов при резонансных частотах колебаний основания как горизонтальных, так и угловых.

Из рис. 8 видно, что при прохождении сейсмических волн резонансной частоты амплитуда колебаний верхней массы монотонно возрастает и после прекращения движения основания ($t > T$) остается постоянной. Поведение кривой показывает: чем больше количество проходящих сейсмических волн резонансной частоты, тем большая конечная амплитуда колебаний сосредоточенных масс, а значит, тем меньше будет предельно допустимая амплитуда $V_m(v_p)$ или $\Theta_{zm}(v_p)$ колебаний основания, при которой возникают начальные пластические деформации в колонне.

На рис. 9 приведены формы собственных колебаний колонн первых трех типов, определенные для двух первых резонансных частот. Номера кривых соответствуют номерам типов колонн. Кривые 1' – 3' соответствуют первой резонансной частоте, а кривые 1'' – 3'' — второй резонансной частоте.

При прохождении сейсмических волн нерезонансной частоты сосредоточенные массы движутся иначе. На рис. 10 изображено движение верхней массы колонны первого типа при частоте горизонтальных колебаний грунта $v = 0,05$ Гц ($V_a = 1$ см), которая меньше первой резонансной частоты (рис. 10, а), и при частоте колебаний $v = 0,2$ Гц ($V_a = 1$ см), лежащей между первой и второй резонансными частотами (рис. 10, б). Кривые 1 на рис. 10 характеризуют абсолютное движение верхней массы (т.е. функцию $V_K(t)$), а кривые 2 — движение этой массы относительно основания колонны (т.е. функцию $V_K(t) - V(t)$; см. (4)). При резонансных частотах соответствующие кривые визуально почти неотличимы, поэтому на рис. 8 приведена лишь одна кривая.

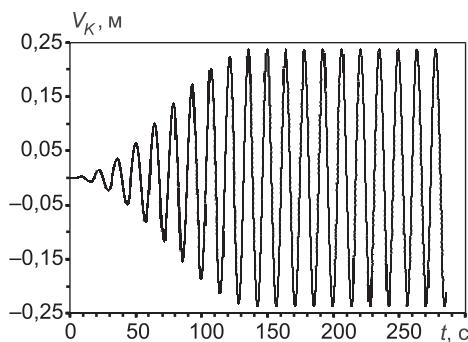


Рис. 8. Колебания верхней сосредоточенной массы колонны при первой резонансной частоте

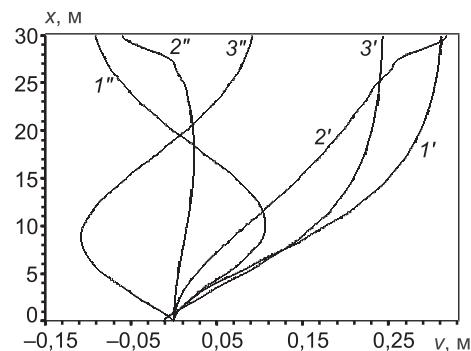


Рис. 9. Формы собственных колебаний колонн

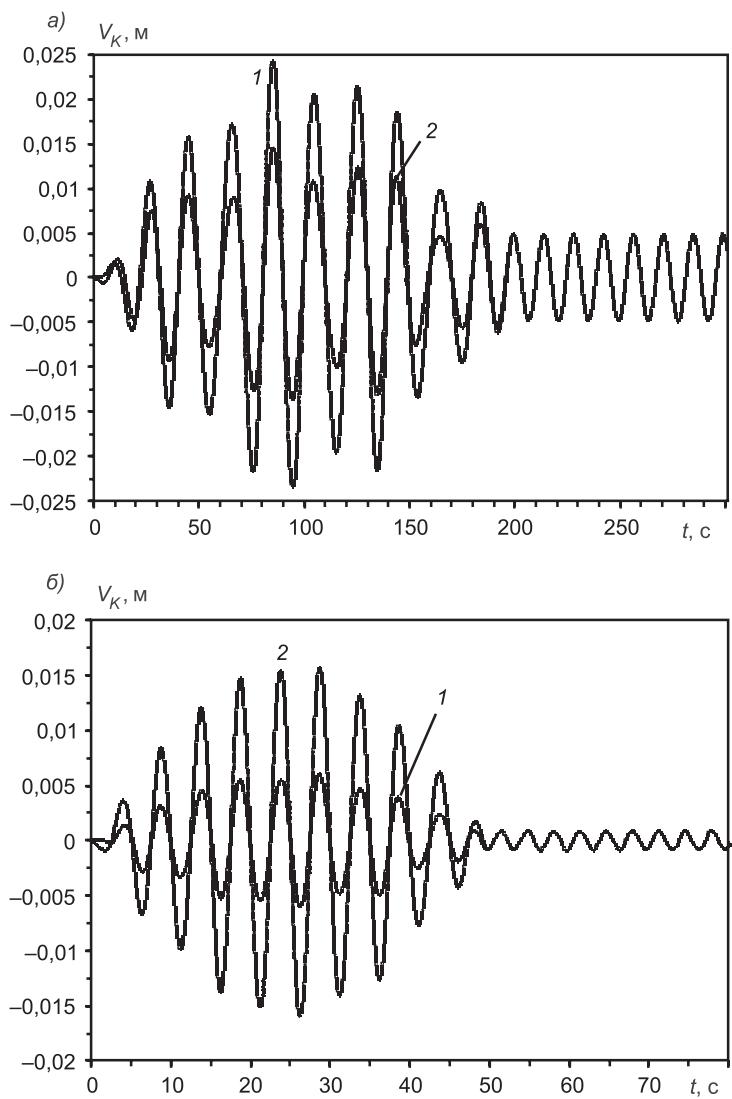


Рис. 10. Колебания верхней массы стойки при нерезонансных частотах сейсмического воздействия до первой резонансной частоты (а) и между первой и второй резонансными частотами (б)

Поведение кривых на рис. 10, а показывает, что до первой резонансной частоты абсолютное движение верхней массы по амплитуде больше относительного движения, а из рис. 10, б видно: при частоте v , лежащей между первой и второй резонансными частотами, относительное движение по амплитуде больше абсолютного. Кроме того, как следует из рис. 10, при колебаниях грунта на нерезонансной частоте в течение времени T сейсмического воздействия амплитуда движения верхней массы резко возрастает (см. левые части рис. 10, а и б), но после прохождения сейсмических волн ($t > T$) эта масса продолжает колебаться с малой амплитудой (см. правые части рис. 10, а и б), что принципиально отличается от движения верхней массы на резонансной частоте (см. рис. 8).

На рис. 11 изображены кривые, характеризующие положение изогнутой оси $v(x)$ колонны первого типа при разных нерезонансных частотах горизонтальных колебаний основания в опасные моменты времени, когда

возникают начальные пластические деформации. Кривая 1 рассчитана при частоте $v = 0,05$ Гц, кривая 2 — при $v = 0,2$ Гц, кривая 3 — при $v = 0,45$ Гц (частоте, лежащей между второй и третьей резонансными). Точки A, B, C отмечают сечения, в которых впервые появляются пластические деформации. Видно, что при колебаниях до первой резонансной частоты (кривая 1) пластические деформации возникают в основании колонны (точка A). При частотах колебаний, лежащих выше первой резонансной частоты (кривые 2, 3), опасны промежуточные сечения ($0 < x \leq L$). Так, на рис. 11 точки B, C имеют ординату $x = 6$ м.

Расчеты показали, что в колоннах второго и четвертого типов начальные пластические деформации всегда возникают под верхней сосредоточенной массой, где равнопрочные стойки имеют наименьшую изгибную жесткость.

Штриховые кривые 2 на рис. 7 почти всюду лежат ниже сплошных линий 1 (исключение составляют лишь окрестности резонансных частот и участки кривых, лежащие левее первой собственной частоты). Это означает, что динамическая сопротивляемость равнопрочных колонн сейсмическим воздействиям в случае рассматриваемых типов компенсаторов при частотах, больших первой резонансной, как правило, ниже, чем у эталонных колонн постоянного поперечного сечения. Следовательно, колонны с рациональными профилями, определенными в естественных условиях эксплуатации высотного здания, не гарантируют высокой эффективности работы этих элементов конструкций при сейсмических или других динамических воздействиях.

Так как АЧХ, приведенные на рис. 7, построены для одних и тех же типов колонн, но при разном сейсмическом воздействии на опорную плиту, то резонансные частоты для этих видов воздействий совпадают, т.е. абсциссы точек локальных минимумов на кривых с одинаковыми номерами равны между собой; отличие заключается лишь в предельных значениях амплитуд V_m , Θ_{zm} сейсмического воздействия.

Согласно кривым 1, 2 на рис. 7, б, колонны весьма чувствительны к угловым колебаниям опорной плиты, так как максимальные углы поворотов Θ_{za} основания колонн порядка одного градуса являются уже опасными, особенно для равнопрочных стоек при частотах колебаний выше первой резонансной (см. кривую 2).

Чтобы избежать негативного влияния угловых колебаний опорной плиты на динамическое поведение колонны при сейсмическом воздействии, целесообразно жесткую заделку корневого сечения колонны заменить на шар-

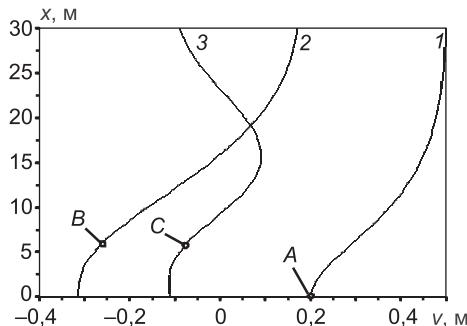


Рис. 11. Формы колебаний стойки первого типа на нерезонансных частотах

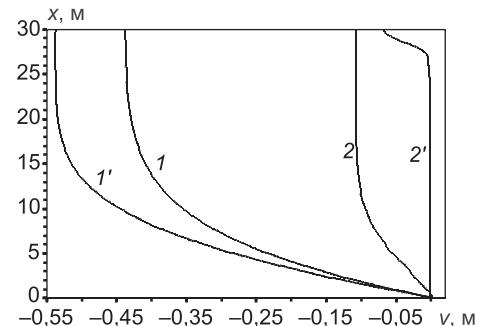


Рис. 12. Формы потери устойчивости несущих колонн с шарнирным опиранием на опорной плите

нирное соединение стойки с опорной плитой. При этом в случае идеального шарнира угловые колебания опорной плиты вообще не будут передаваться на несущую колонну. Однако такая замена типа закрепления стойки на опорной плите скажется на характеристиках устойчивого деформирования колонны. Если на опорной плите установить компенсатор типа изображенного на рис. 1 (сопротивляющийся угловым поворотам корневого сечения колонны при ее шарнирном опирании), то критические параметры колонны будут зависеть от жесткости H_{z0} этого компенсатора. Так, на рис. 4 штриховая линия 2 характеризует зависимость $F_*(H_{z0})$ для шарнирно опертой колонны постоянного поперечного сечения при условии, что на всех сосредоточенных массах (межэтажных перекрытиях) установлены компенсаторы с жесткостью $H_z = 10^7$ (Н · м)/рад.

Аналогично на рис. 6 штриховая кривая 2 определяет зависимость $n_*(H_{z0})$ для равнопрочной шарнирно опертой колонны при том же условии, что на всех межэтажных перекрытиях работают компенсаторы с жесткостью $H_z = 10^7$ (Н · м)/рад.

При разных значениях H_{z0} такие стойки теряют устойчивость по разным формам. На рис. 12 кривые 1, 2 характеризуют формы потери устойчивости колонн третьего типа (при $F = F_*$), а линии 1', 2' — стоек четвертого типа (в случае $n = n_*$). Линии 1, 1' соответствуют значению $H_{z0} = 10^5$ (Н · м)/рад, а кривые 2, 2' — значению $H_{z0} = 10^7$ (Н · м)/рад. Поведение кривых 2, 2' показывает, что в последнем случае колонна третьего типа теряет устойчивость локально в окрестности опоры, а стойка четвертого типа — локально в окрестности верхней сосредоточенной массы.

Поведение кривых 2 на рис. 4 и 6 показывает, что зависимости $F_*(H_{z0})$, $n_*(H_{z0})$ для колонн третьего и четвертого типов монотонно убывают и при $H_{z0} > 10^7$ (Н · м)/рад их изменения незначительны. Следовательно, чем больше жесткость компенсатора на опорном шарнире, тем больше возможная экономия материала колонны по условию устойчивости. Так, при полном отсутствии компенсатора на опорной плите ($H_{z0} = 0$) критическая площадь F_* колонны третьего типа в 2,07 раза больше использованной в расчетах площади поперечного сечения колонны первого типа (см. левую точку на кривой 2 рис. 4 при $H_{z0} = 0$). Аналогично и для колонны четвертого типа $n_* = 4,54$ при $H_{z0} = 0$, что больше значения $n_2 = 4$, которое использовалось в расчетах для определения поперечных сечений равнопрочной стойки второго типа.

Таким образом, замена жесткой заделки корневого сечения в опорной плите на шарнирное опирание, позволяющая исключить влияние угловых колебаний опорной плиты на колонну, приводит к значительному увеличению расхода материала стойки (для колонн постоянного поперечного сечения более чем в два раза). Уменьшить расход материала колонны при этом можно за счет установки на опорной плите компенсатора с жесткостью $H_{z0} > 0$, но при этом угловые колебания опорной плиты будут передаваться на стойку и влиять на ее динамическое поведение тем больше, чем больше жесткость этого компенсатора.

В соответствии с поведением кривых 2 на рис. 4 и 6 выберем значение $H_{z0} = 10^7$ (Н · м)/рад, равное жесткости компенсаторов, установленных на межэтажных перекрытиях. При этом для колонны третьего типа площадь поперечного сечения можно задать равной площади сечения колонны первого типа ($F = 150$ см²), которая в 1,272 раза превосходит значение критической площади F_* ($F/F_* = 1,272$). Для равнопроч-

ной колонны четвертого типа условный коэффициент запаса n_4 можно задать равным коэффициенту запаса колонны второго типа ($n_4 = n_2 = 4$), значение которого на 25 % больше соответствующего критического n_* ($n_4/n_* = 1,25$). Такое задание величин F и n_4 для колонн третьего и четвертого типов обеспечивает в них такой же расход материала, как в колоннах первого и второго типов соответственно. Именно для этих значений F и n_4 проводились расчеты колонн третьего и четвертого типов. АЧХ этих стоек изображены на рис. 7 кривыми 3, 4 соответственно.

Сравнение кривых 1, 3 на рис. 7, б показывает, что для колонн постоянного поперечного сечения ($F = 150 \text{ см}^2$) замена жесткой заделки стойки в опорной плите на шарнирное опирание с компенсатором, жесткость которого $H_{z0} = 10^7 (\text{Н} \cdot \text{м})/\text{рад}$, не приводит к принципиальному увеличению динамической сопротивляемости такой колонны при угловых колебаниях опорной плиты. Сопоставление же линий 2, 4 на этом рисунке свидетельствует о том, что при частотах, больших первой резонансной, указанная замена типа опирания равнопрочной стойки положительно сказывается на ее сопротивляемости сейсмическому воздействию, вызванному угловыми колебаниями опорной плиты. Согласно же кривым 2, 4 на рис. 7, а, при тех же частотах такая замена позитивно отражается на динамическом поведении равнопрочной колонны и при горизонтальных смещениях опорной плиты.

Как видно из рис. 7, при частотах колебаний, больших первой резонансной, кривые 1, 3 в основном лежат выше линий 2, 4 соответственно. Следовательно, колонны первого и третьего типов (постоянного поперечного сечения) лучше сопротивляются сейсмическим воздействиям рассматриваемых видов по сравнению с равнопрочными колоннами второго и четвертого типов. Напомним, расход материала в колоннах первого и третьего типов на 10 % меньше, чем в стойках второго и четвертого типов. Следовательно, не при любых условиях эксплуатации равнопрочные колонны являются оптимальными или даже рациональными. При этом нужно еще учитывать, что такие колонны более трудоемкие при их изготовлении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Немировский, Ю.В. Расчет и исследование поперечного деформирования несущей колонны высотного здания при горизонтальных сейсмических колебаниях основания и прохождении поверхностных волн. Сообщение 1. Постановка задачи [Текст] / Ю.В. Немировский, А.П. Янковский // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 9. — С. 17–26.
2. Немировский, Ю.В. Расчет и исследование поперечного деформирования несущей колонны высотного здания при горизонтальных сейсмических колебаниях основания и прохождении поверхностных волн. Сообщение 2. Метод расчета [Текст] / Ю.В. Немировский, А.П. Янковский // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 4. — С. 29–42.
3. СНиП II-23-81*: Стальные конструкции [Текст] / Госстрой России. — М. : ГУП ЦПП, 2003. — 90 с.
4. Немировский, Ю.В. О рациональном распределении материалов при высотном строительстве [Текст] / Ю.В. Немировский // Строительные и отделочные материалы. Стандарты XXI века : Тр. VIII Междунар. семинара (Новосибирск, 19–21 сент. 2006 г.). — Новосибирск : Изд-во НГАСУ, 2006. — Т. 2. — С. 134–138.

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

ЯНКОВСКИЙ А.П., д-р физ.-мат. наук
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
СО РАН, г. Новосибирск

Получено после доработки 20.12.10

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

Yankovsky A.P., doctor of physical and mathematical sciences, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Novosibirsk, Russia

**ANALYSIS OF RESULTS OF CALCULATIONS
OF CROSS-SECTION DEFORMATION OF THE SOLID CARRYING
COLUMN OF THE HIGH-RISE BUILDING IN VIEW OF WORK
OF CANCELLER AT HORIZONTAL SEISMIC FLUCTUATIONS
OF THE BASIS AND PASSAGE OF SUPERFICIAL WAVES**

The analysis of decisions of dynamic behaviour of carrying steel columns of high-rise buildings is lead at horizontal seismic fluctuations of a ground and passage of Rayleigh superficial waves in view of work of the cancellers, sections of racks resisting to turn. Peak-frequency characteristics of continuous columns of four types are constructed and features of behaviour of these characteristics are explained. It is shown, that equal-strength in a natural condition of operation of a column not always allow to save their material in comparison with reference columns of constant cross-section section and at dynamic (seismic) influences such columns do not guarantee a high overall performance in comparison with reference designs.

Key words: seismic influence, carrying column, high-rise building, dynamic deformation, stability, cancellers.

REFERENCES

1. Nemirovsky, Yu.V. Calculation and research of transverse deformation of supporting column of high-rise building at horizontal seismic oscillations of basis and passage of surface waves. Message 1. Problem definition [Text] / Yu.V. Nemirovsky, A.P. Yankovsky // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 9. — P. 17–26.
2. Nemirovsky, Yu.V. Calculation and research of transverse deformation of supporting column of high-rise building at horizontal seismic oscillations of basis and passage of surface waves. Message 2. Method of calculation [Text] / Yu.V. Nemirovsky, A.P. Yankovsky // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 4. — P. 29–42.
3. SNiP II-23-81*: Steel construction [Text] / Gosstroy of Russia. — M.: State Unitary Enterprise CPP, 2003. — 90 p.
4. Nemirovsky, Yu.V. About rational distribution of materials at high-rise construction [Text] / Yu.V. Nemirovsky // Building and leather finishing agents. Standards of XXI century: Proc. VIII Intern. seminar (Novosibirsk, Sept. 19–21, 2006). — Novosibirsk : Publ. House NGASU, 2006. — V. 2. — P. 134–138.

УДК 539.3

В.Е. МИРЕНКОВ, В.А. ШУТОВ, В.А. ПОЛУЭКТОВ

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ СВОЙСТВ, ГЕОМЕТРИИ ОСЛАБЛЕНИЙ
И ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ
КУСОЧНО-ОДНОРОДНЫХ ПЛАСТИН***

Предложен метод решения обратных задач для кусочно-однородных пластин с использованием натурных замеров смещений на доступной части ее периметра. Это стало возможным благодаря полученной системе сингулярных интегральных уравнений, связывающей значения нормальных и касательных напряжений и смещений на границе области. Проблема сводится к итерационной процедуре.

Ключевые слова: граничные условия, обратная задача, регуляризация, подход Колосова–Мусхелишвили, интегральные уравнения.

В механике можно замерить только смещения, все остальное связано с пересчетом, а это, как правило, обратные задачи, важность которых для науки безгранична. Типичная обратная задача состоит в следующем: в некоторой части упругой области задается режим деформирования и требуется определить или создать реализующие этот режим источники, которые могут иметь как реологическую природу, так и определяться граничными условиями или дефектами структуры. Обратные задачи, возникающие в различных областях знаний, относятся к классу некорректных.

Рассмотрим физическое явление, характеризуемое функцией σ . Как правило, σ недоступна для прямого изучения и проявляется через смещение u в виде

$$A\sigma = u, \quad (1)$$

где A — некоторый функционал. Смещения получают как результат натурных измерений, имеющих определенную погрешность δ :

$$A\sigma = u_\delta. \quad (2)$$

Возникает задача нахождения приближенного решения уравнения (2), для которого обратный оператор A^{-1} может быть разрывным и это решение не может быть найдено обращением оператора A , т.е. как

$$\sigma = A^{-1}u_\delta. \quad (3)$$

Полученное формально решение (3) не будет обладать устойчивостью к малым изменениям правой части (2). Определение приближенного значения σ_δ возможно лишь с помощью использования так называемого регуляризующего оператора, значение которого согласуется с величиной погрешности δ натурных данных. Эта согласованность должна быть такой, чтобы при $\delta \rightarrow 0$ приближенное решение σ_δ стремилось к точному решению σ уравнения (2). Для получения устойчивого к малым измене-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 09-05-00133).

ниям исходных данных приближенного решения используются методы регуляризации¹. Выбор регуляризующего оператора определяется физическим содержанием решаемой проблемы².

Мы понимаем регуляризацию как попытку исправить «сознательно» допущенные неточности в виде априорных предположений о поведении конструкции, отличных от условий, допускаемых моделью (например, абсолютная жесткость со сцеплением, идеальное проскальзывание, скачок смещений и т.д.). Последнее всегда тождественно несоответствию модели и счета. Регуляризация в конкретной задаче неизвестна и представляет попытку ввести ту или иную небольшую поправку, обеспечивающую качественное совпадение модели и счета, т.е. исправить получающееся, вообще говоря, вырожденное интегральное уравнение, если его удается получить.

В качестве примера рассмотрим задачу о вдавливании упругого штампа с горизонтальным основанием в упругую полуплоскость, которая в [1] упрощена до случая абсолютно жесткого штампа, вдавливаемого в полуплоскость со сцеплением на контакте. «Точное» решение этой задачи приведено в [1], а точная система сингулярных интегральных уравнений, связывающая компоненты напряжений и смещений на границе полуплоскости, приведена в [2] и имеет вид

$$2\mu u'(x) = a\sigma_y(x) + b \int_{-1}^1 \frac{\tau(t)}{t-x} dt, \quad 2\mu v'(x) = -a\tau(x) + b \int_{-1}^1 \frac{\sigma_y(t)}{t-x} dt, \quad (4)$$

где μ , a , b характеризуют среду полуплоскости;

$u'(x)$, $v'(x)$ — производные от компонент смещений;

σ_y , τ — нормальное и касательное напряжения на границе полуплоскости.

Система (4) с учетом допущений, принятых в [1], перепишется в виде

$$\frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{\tau(t)}{t-x} dt + \frac{a}{b} \sigma_y(x) = 0, \quad \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \frac{\sigma_y(t)}{t-x} dt - \frac{a}{b} \tau(x) = 0. \quad (5)$$

Это решение не только не ограничено при $x \rightarrow \pm 1$, но и не имеет предела при $x \rightarrow \pm 1$, что не согласуется с основами теории упругости, а также вырожденностью системы (5). Этот феномен обсуждался детально в [2]. В создавшейся ситуации необходимо вернуться к исходной формулировке задачи — ослабить или полностью исключить априорные предположения о процессе деформирования или регуляризовать систему (5) и получить приближенное решение.

Таким образом, использование экспериментальных данных, определенных с погрешностью, дискретизация сплошной среды при любом численном счете вносят погрешность в обратный оператор, априорные предположения о характере деформирования конструкции вносят погрешность в граничные условия при формулировке задачи и расширяют класс обратных задач. Все такие обратные задачи некорректны, т.е. их решения могут не существовать, быть не единственными или не устойчивыми (малым изменениям наблюдаемых данных могут соответствовать большие изменения искомых). Для всех этих задач общее требование — преодоление некорректности через регуляризацию [3, 4] или через получение точных уравнений, описывающих процесс деформирования в рамках выбранной модели, исключающих обращение оператора типа (2).

¹ Колмогоров А.Н. Теория информации и теория алгоритмов. М.: Наука, 1987. 303 с.

² Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 386 с.

Практически в любой области знания обратные задачи занимают особое место, т.е. во всех случаях, когда нет точного решения, проблема сводится к регуляризации того, что предположили авторы (мягкие и жесткие накладки, нарушение конформности в конечном числе точек, скачки смещений, абсолютно жесткое тело, дискретизация среды и т.п.).

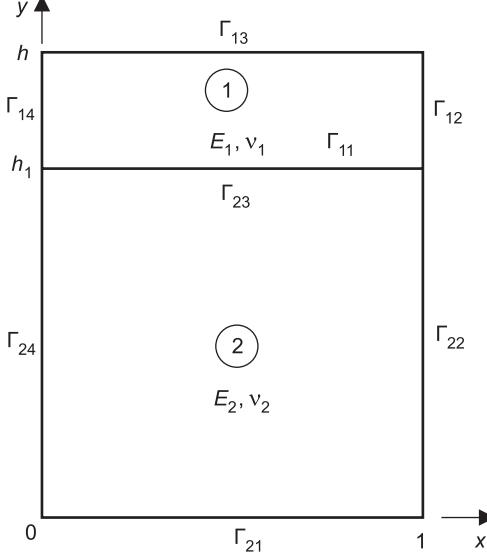


Рис. 1. Расчетная схема составной пластины Ω

Для каждой из частей пластины записываем уравнения [2], связывающие нормальные и касательные напряжения и смещения на контуре $\Gamma_m = \Gamma_{m1} + \Gamma_{m2} + \Gamma_{m3} + \Gamma_{m4}$, $m = 1, 2$, в виде

$$f(t_0) + 2\mu q(t_0) = \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma_m} \frac{f(t) + 2\mu q(t)}{t - t_0} dt,$$

$$\overline{k t(t_0)} - 2\mu \overline{q(t_0)} = \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma_m} \frac{\overline{k f(t)} - 2\mu \overline{q(t)}}{t - t_0} dt - \frac{1}{\pi i} \int_{\Gamma_m} [f(t) + 2\mu q(t)] d \frac{\bar{t} - \bar{t}_0}{t - t_0}, \quad (6)$$

где $k = 3 - 4v$;

$\mu = E [2(1 + v)]^{-1}$; v — коэффициент Пуассона, E — модуль Юнга; $q = u + iv$, u, v — компоненты смещений в направлении осей x и y ;

$$f(t) = i \int_0^t (x_n + iy_n) ds = f_1(t) + if_2(t), \quad (7)$$

x_n, y_n — компоненты усилий в направлении осей x и y соответственно;

$t \in \Gamma_m$, $m = 1, 2$;

t_0 — аффикс точки границы; i — мнимая единица;

$m = 1, 2$ указывает на отношения к частям 1 и 2 области Ω .

Приведем только систему уравнений, связывающую значения u, v , f_{131}, f_{132} на Γ_{13} , в виде

$$2\kappa_1 f_{131}(x) = -2\mu_1 (\kappa_1 - 1) u_{13}(x) + \frac{2\mu_1}{\pi} \int_1^0 \frac{(\kappa_1 + 1)v_{13}}{s - x} ds -$$

В статье рассматривается прямоугольная кусочно-однородная пластина. Термин «идентификация» в работе означает, что решается задача определения координат границы раздела свойств пластины по результатам измерения смещений на части границы Γ области Ω при неизвестных значениях упругих констант материала и неизвестных контактных условиях на части Γ , через которую происходит нагружение.

Расчетная схема кусочно-однородной пластины представлена на рис. 1. Величины, имеющие размерность длины, отнесены к характерной длине Γ_{11} , а размерность направлений — к характерной максимальной величине напряжений на $\Gamma_{12}(\Gamma_{21})$.

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^1 \frac{(h-h_1)[2\kappa_1 f_{111} + 2\mu_1(\kappa_1-1)u_{11}] + 2\mu_1(\kappa_1+1)(s-x)v_{11}}{(s-x)^2 + (h-h_1)^2} ds + \right. \\
& + \int_0^{h-h_1} \frac{(1-\kappa_1)[2\kappa_1 f_{121} + 2\mu_1(\kappa_1-1)u_{12}] + 2\mu_1(\kappa_1+1)(x-h+h_1)v_{12}}{(s-h-h_1)^2 + (1-x)^2} ds + \\
& + \left. \int_{h-h_1}^0 \frac{-x[2\kappa_1 f_{141} + 2\mu_1(\kappa_1-1)u_{14}] + 2\mu_1(\kappa_1+1)(s-h+h_1)v_{14}}{(s-h-h_1)^2 + x^2} ds \right\} + \\
& + \frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^{h-h_1} \frac{1}{[(s-x)^2 + (h-h_1)^2]^2} \{4(h-h_1)^2(s-x)(f_{112} + 2\mu_1 v_{11}) - \right. \\
& \quad \left. - 2(h-h_1)[(s-x)^2 - (h-h_1)^2](f_{111} + 2\mu_1 u_{11})\} ds + \right. \\
& + \int_0^{h-h_1} \frac{1}{[(s-h+h_1)^2 + (1-x)^2]^2} \{-2(1-x)^2(s-h+h_1)(f_{122} + 2\mu_1 v_{12}) - \\
& \quad \left. - 2(1-x)[(1-x)^2 - (s-h+h_1)^2](f_{121} + 2\mu_1 u_{12})\} ds + \right. \\
& + \left. \int_{h-h_1}^0 \frac{1}{[(s-h+h_1)^2 + x^2]^2} \{2x[x^2 - (s-h+h_1)^2](f_{141} + 2\mu_1 u_{14}) - \right. \\
& \quad \left. - 4x^2(s-h+h_1)(f_{142} + 2\mu_1 v_{14})\} ds, \right. \tag{8} \\
& 2\kappa_1 f_{132}(x) = -2\mu_1(\kappa_1-1)v_{13}(x) - \frac{2\mu_1}{\pi} \int_1^0 \frac{(\kappa_1+1)u_{13}}{s-x} ds - \\
& - \frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^1 \frac{2\mu_1(\kappa_1+1)(s-x)u_{11} - (h-h_1)[(\kappa_1+1)f_{112} + 2\mu_1(\kappa_1-1)v_{11}]}{(s-x)^2 + (h-h_1)^2} ds + \right. \\
& + \int_0^{h-h_1} \frac{2\mu_1(\kappa_1+1)(s-h+h_1)u_{12} - (1-x)[(\kappa_1+1)f_{122} + 2\mu_1(\kappa_1-1)v_{12}]}{(s-h+h_1)^2 + (1-x)^2} ds + \\
& + \left. \int_{h-h_1}^0 \frac{2\mu_1(\kappa_1+1)(s-h+h_1)u_{14} + x[(\kappa_1+1)f_{142} + 2\mu_1(\kappa_1-1)v_{14}]}{(s-h+h_1)^2 + x^2} ds \right\} + \\
& + \frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^1 \frac{1}{[(s-x)^2 + (h-h_1)^2]^2} \{4(h-h_1)^2(s-x)(f_{111} + 2\mu_1 u_{11}) + \right. \\
& \quad \left. + 2(h-h_1)[(s-x)^2 - h^2](f_{112} + 2\mu_1 v_{11})\} ds \right\} + \\
& + \int_0^{h-h_1} \frac{1}{[(s-h+h_1)^2 + (1-x)^2]^2} \{-2(1-x)^2(s-h+h_1)(f_{121} + 2\mu_1 u_{12}) +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + 2(1-x)[(1-x)^2 - (s-h+h_1)^2](f_{122} + 2\mu_1 v_{12})\} ds + \\
& + \int_{h-h_1}^0 \frac{1}{[(s-h-h_1)^2 + x^2]^2} \{-4x^2(s-h+h_1)(f_{141} + 2\mu_1 u_{14}) - \\
& - 2x[x^2 - (s-h+h_1)^2](f_{142} + 2\mu_1 v_{14})ds\}. \tag{8}
\end{aligned}$$

Здесь в $f_{\alpha\beta\gamma}$ индекс α — отношение к части составного блока, индекс β определяет участок границы рассматриваемой части блока, γ соответствует представлению (7).

Имеется кусочно-однородная пластина, представленная на рис. 1. Не известны ни упругие характеристики составляющих пластину частей, ни их геометрия, ни возникающие на гранях Γ_{13} , Γ_{21} и $\Gamma_{11}(\Gamma_{23})$ контактные условия при ее нагружении. На боковых, свободных для доступа, гранях $\Gamma_{12} + \Gamma_{21}$ и $\Gamma_{14} + \Gamma_{24}$

$$\sigma_x = \tau = 0. \tag{9}$$

Замеряют компоненты смещений, т.е. будем считать их известными на $\Gamma_{12} + \Gamma_{22}$ и $\Gamma_{14} + \Gamma_{24}$:

$$u = u_0(y), v = v_0(y). \tag{10}$$

Для решения прямых задач сформулируем граничные условия в первом приближении в виде

$$v = v_0 = \text{const}, \quad u = 0 \quad \text{на } \Gamma_{13} \text{ и } \Gamma_{21}, \tag{11}$$

а на $\Gamma_{11}(\Gamma_{23})$ — условие сцепления

$$\sigma_y^+ = \sigma_y^-, \quad \tau^+ = \tau^-, \quad u^+ = u^-, \quad v^+ = v^-, \tag{12}$$

где знаки «+» и «-» означают стремление к $\Gamma_{11}(\Gamma_{23})$ частей 1 и 2 (рис. 1).

Обратная задача одновременного восстановления нагрузок на Γ_{21} , $\Gamma_{11}(\Gamma_{23})$ и Γ_{13} , идентификации положения границы раздела свойств частей, составляющих пластину, и определение их модулей упругости требуют знания первого приближения всех искомых параметров при дополнительной информации (10). В качестве примера рассмотрим задачу (9), (11) и (12), полагая коэффициенты Пуассона $v_1 = v_2 = 0,2$, а модуль Юнга $E_1 = 3E_2$ ($E_2 = 10^4$), решение которой приведено на рис. 2 и 3, где $h_1 = 1,5$ и $h = 2$, кривая 1 отвечает случаю $E_1 = E_2$, кривая 2 — случаю $E_1 = 3E_2$, кривая 3 — случаю $E_2 = 3E_1$. Компоненты смещений и значений функций напряжений (7) представлены для контуров частей 1 и 2, развернутых в прямые линии так, что граням $\Gamma_{11}(\Gamma_{21})$ соответствуют точки от 1 до 21, граням $\Gamma_{12}(\Gamma_{22})$ — точки от 21 до 41, граням $\Gamma_{13}(\Gamma_{23})$ — точки от 41 до 61 и граням $\Gamma_{14}(\Gamma_{24})$ — точки от 61 до 81. Здесь N — число разбиений периметров частей 1 и 2. Расчеты показывают, что для различных граничных условий, формулируемых на гранях Γ_{21} , Γ_{11} и Γ_{13} (см. рис. 1), характер смещения контуров частей составной пластины позволяет использовать предложенную здесь методику идентификации.

При отсутствии натурных данных в качестве примера реализации метода идентификации будем считать, что для пластины замеренные смещения (10) имеют вид кривой 2, представленной на рис. 2 и 3, откуда следует, что $u(0) = u(1) = 0$. По положению линий перегиба смещений при-

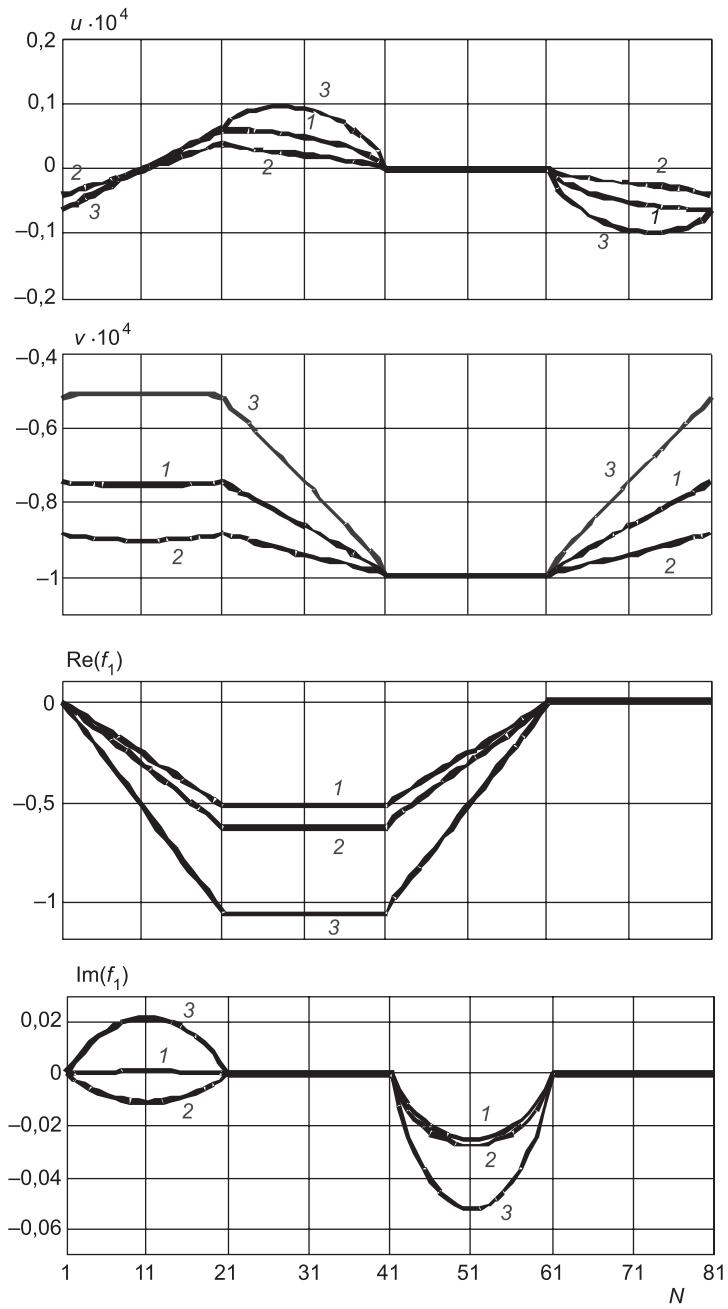


Рис. 2. Деформирование верхней части пластины

мем, что граница раздела свойств пород имеет координату $y \approx 1,5$, и по характеру (10) имеем $E_1 > E_2$, а условия на контакте $y \approx 1,5$ близки к (12). При других значениях (10) приближения (11), (12) можно заменить на другие, что не вызывает затруднений, так как соотношения (6) связывают все три основные задачи теории упругости. Для определения модулей упругости частей пластины используем подход, основанный на итерационной процедуре решения ряда прямых задач, варьируя их значения (для простоты, не уменьшая точности приближения, примем $v_1 = v_2 = 0,2$). Начиная со значений $E_1 = 2E_2$ с шагом $\Delta_1 = 0,5$, приходим к значению $E_1 = 3E_2$, после чего соотношение $E_1 = 3,5E_2$ показывает необ-

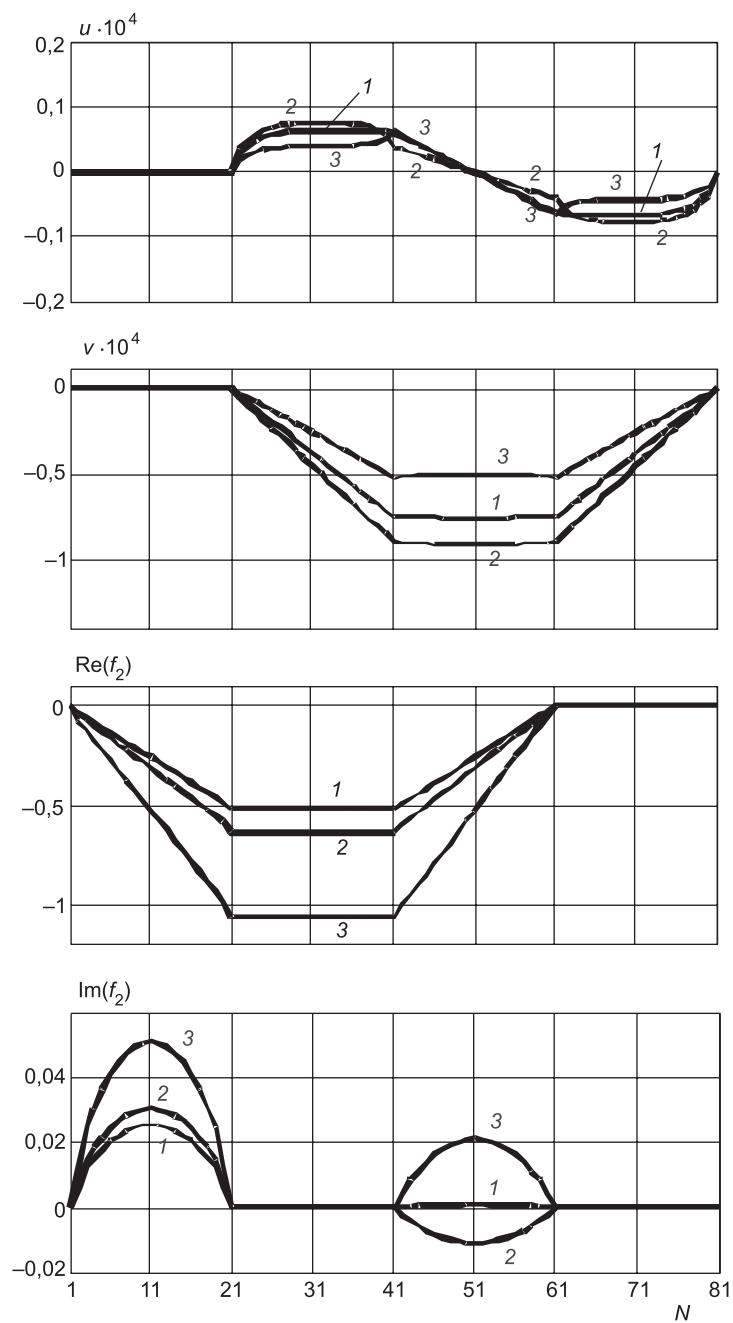


Рис. 3. Деформирование нижней части пластины

ходимость изменить шаг, приняв $\Delta_2 = 0,1$. Убеждаемся, что приближения колеблются около значения $E_1 = 3E_2$ при любом шаге, которое и принимаем за первое приближение. Для границы раздела свойств частей пластины из решения прямых задач, рассмотрев варианты $y = 1,5 + \omega_1$ (ω_1 — шаг приближения), убеждаемся, сравнивая вычисленные смещения боковых граней и натурные замеры (10), что приближения колеблются около значения $y = 1,5$, которое и примем за первое приближение.

Переходя к восстановлению граничных условий на Γ_{13} и Γ_{21} , в первом приближении для (9), (11) и (12) определяем напряженно-деформированное состояние на контурах частей, составляющих пластину, в том числе и

$$f_{111}, f_{112}; u_{11}, v_{11} \text{ на } \Gamma_{11} (\Gamma_{23}). \quad (13)$$

Подставляя в (8) значения (11), (13) и (10), получим

$$f_{131}, f_{132} \text{ и } f_{211}, f_{212}. \quad (14)$$

Теперь для каждой из частей пластины решаем задачу в усилиях. Используя (13), (14) и (9), определяем компоненты смещений на Γ_{13} и Γ_{21} :

$$u_{13}^2, v_{13}^2; u_{21}^2, v_{21}^2, \quad (15)$$

которые рассматриваем как второе приближение на Γ_{13} и Γ_{21} . На этом первый цикл приближений заканчивается. Второй цикл повторяет первый, только вместо (11) используются компоненты (15). Циклы продолжаются до получения наперед заданной точности.

Погрешность натурных данных (10) для δ , принятая 5 % для всех точек $0 \leq y \leq h$, слабо сказывается на значениях (8) и обеспечивает получение точного решения при $\delta \rightarrow 0$. Если эта погрешность имеет место только в некоторых точках, то она практически не влияет на точность.

Таким образом, полученная система сингулярных интегральных уравнений, связывающая значения компонент напряжений и смещений на границе кусочно-однородной пластины, позволила создать метод идентификации механических характеристик составляющих его частей, координат границы раздела свойств и граничных условий на контактах на основе решения прямых задач и информации о поле перемещений на его доступной для замеров поверхности. Численный эксперимент показал, что метод приводит к сходимости решения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мусхелишвили, Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости [Текст] / Н.И. Мусхелишвили. — М. : Наука, 1966. — 708 с.
2. Миренков, В.Е. Математическое моделирование деформирования горных пород около ослаблений [Текст] / В.Е. Миренков, В.А. Шутов. — Новосибирск : Наука, 2009. — 176 с.
3. Капцов, А.В. Идентификация плоской трещины в упругом теле с помощью инвариантных интегралов [Текст] / А.В. Капцов, Е.И. Шифрин // Изв. РАН. Механика твердого тела. — 2008. — № 3. — С. 215–227.
4. Победря, Б.Е. Идентификация коэффициентов нестационарного уравнения теплопроводности [Текст] / Б.Е. Победря, А.С. Кравчук, П.А. Аризпе // Вычислительная механика сплошных сред. — 2008. — Т. 1, № 4. — С. 78–87.

МИРЕНКОВ В.Е., д-р техн. наук, проф.

*Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия
ШУТОВ В.А., д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия
ПОЛУЭКТОВ В.А., канд. техн. наук, доц.*

Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия

Получено 11.01.11

Mirenkov V.E., doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

Shutov V.A., doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

Poluektov V.A., candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

IDENTIFICATION OF PROPERTIES, GEOMETRY AND BOUNDARY CONDITIONS FOR PIECEWISE-HOMOGENEOUS PLATES

A solution method for inverse problems concerning piecewise-homogeneous plates is proposed. The measured displacements of the boundary part which is accessible for experimental observation are utilized. The solution of the problem is based on the obtained system of singular integral equations. This system relates normal and tangential stresses as well as displacements on the domain boundary. The problem is reduced to an iterative procedure.

Key words: boundary conditions, inverse problem, regularization, Kolosov-Muskhelishvili approach, integral equations.

REFERENCES

1. Muskhelishvili, N.I. Some basic problems of the mathematical theory of elasticity [Text] / N.I. Muskhelishvili. — M. : Science, 1966. — 708 p.
 2. Mirenkov, V.E. Matematicheskoe modelirovaniye deformirovaniya gornykh porod okolo oslablenij [Text] / V.E. Mirenkov, V.A. Shutov. — Novosibirsk : Nauka, 2009. — 176 p.
 3. Kapcov, A.V. Identifikacija ploskoy treshhiny v uprugom tele s pomoshch'yu invariantnykh integralov [Text] / A.V. Kapcov, E.I. Shifrin // Izv. RAN MTT. — 2008. — N 3. — P. 215–227.
 4. Pobedrja, B.E. Identifikacija koefitsientov nestacionarnogo uravnenija teploprovodnosti [Text] / B.E. Pobedrja, A.S. Kravchuk, P.A. Arizpe // Vychislitel'naja mehanika sploshnykh sred. — 2008. — Vol. 4. — P. 78–87.
-

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.327:666.973.2:666.64-492.3

В.А. КУЛИКОВ, В.З. АБДРАХИМОВ, И.В. КОВКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ КЕРАМЗИТА НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ФЛОТАЦИИ УГЛЕОБОГАЩЕНИЯ

Исследования показали, что применение метода укрупненных показателей С.А. Салтыкова дает возможность получить количественную оценку макроструктуры керамзита и в сочетании с физико-техническими его показателями позволяет объективно оценить комплекс свойств, которыми могут обладать пористые заполнители.

Ключевые слова: изометрические поры, керамзит, макроструктура, монтмориллонитовая глина, отходы обогащения, пористость, структура пористости, щелевидные поры.

В настоящее время в связи с интенсификацией строительства значительно возросла потребность в легких пористых заполнителях типа керамзита. Керамзит — пористый керамический заполнитель, занимающий первое место по объему производства в России среди легких заполнителей.

Добыча и переработка природного минерального сырья связана с образованием больших количеств различных промышленных отходов, накопление которых приводит к ухудшению экологической обстановки в регионах. Одним из аспектов решения этой актуальной проблемы является применение техногенного сырья в керамических материалах.

Исследованиями¹ установлено, что оптимальная температура вспучивания растворимого натриевого стекла (РНС), модифицированного хлоридом натрия (ХН), с точки зрения получения вспученных гранул (ВГ) 250...300 °C. Но полученный таким образом материал обладает низкой прочностью при сжатии, что ограничивает его область применения. Была изучена возможность повышения прочности легкого заполнителя на основе модифицированного хлоридом натрия РНС путем введения в сырьевую смесь глины².

В работах [1, 2] показана принципиальная возможность повышения прочности керамзита, полученного на основе модифицированного хлоридом натрия РНС, путем введения в сырьевую смесь отходов флотации углеобогащения и монтмориллонитовой глины.

Используемые отходы флотации получены при обогащении углей Кузнецкого угольного бассейна Томусинского разреза на Групповой обогатительной фабрике «Томусинская» (г. Междуреченск Кемеровской области).

Химический состав отходов флотации углеобогащения и монтмориллонитовой глины Смышляевского месторождения представлен в табл. 1, а технологические свойства глинистого сырья приведены в табл. 2 [1, 3].

¹ Мизюров С.А., Иванова Н.В., Мамонтов А.Н. Термическая вспучиваемость гидратированных силикатов натрия // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика: Матер. 66-й Всерос. науч.-техн. конф. по итогам НИР ун-та за 2008. г. Самара: СГАСУ, 2009. С. 193–194.

² Мизюров С.А., Иванова Н.В., Мамонтов А.Н. Регулирование основных характеристик пористого заполнителя на основе РНС / Там же. С. 197.

Таблица 1
Химический состав отходов углеобогащения и монтмориллонитовой глины

Компоненты	Содержание оксидов, мас. %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R ₂ O	SO ₃	П.п.п.
Отходы углеобогащения	50,40	18,56	6,4	1,51	0,50	4,78	0,90	16,5
Монтмориллонитовая глина	57,5	15,6	4,2	2,1	7,3	3,5	0,5	7,8

Таблица 2
Технологические свойства монтмориллонитовой глины

Число пластичности	Содержание глинистых частиц (размером менее 0,005 мм)	Огнеупорность, °C	По спекаемости	Оптимальная температура вслучивания, °C	Температурный интервал вслучивания, °C
25...45	55...65	1150...1200	Не спекается (вспучивается)	1160	1100...1300

Следует отметить, что в отходах флотации углеобогащения содержится выгораемое органическое топливо, что подтверждается высокими потерями при прокаливании (см. табл. 1). Данное обстоятельство делает использование флотационных отходов в производстве керамзита чрезвычайно предпочтительным, так как позволяет не вводить в шихту органическую вспучивающую добавку.

Изготовление керамзита осуществлялось в лабораторных условиях по традиционной технологии из оптимального состава, мас. %: отходы флотации углеобогащения — 40, монтмориллонитовая глина Смышляевского месторождения — 40, хлорид натрия — 2,6, жидкое стекло — 17,4. После подсушивания в естественных условиях компоненты измельчались на лабораторных «бегунах» до прохождения сквозь сито с отверстиями 1,2 мм, затем тщательно перемешивались в указанном соотношении. Полученная смесь затворялась водой до формовочной влажности. Подготовленная шихта с целью усреднения ее влажности помещалась на одни сутки в экскаватор, после чего из нее формовались сферические гранулы диаметром около 16 мм. Обжиг образцов проводился в лабораторной печи при температуре 1050 °C (учитывалось, что в интервале температур 550...900 °C распадается каолинит, содержащийся в отходах флотации, и монтмориллонит, содержащийся в смышляевской глине) [4]. За счет использования в составах керамических масс модифицированного жидкого стекла температура вслучивания керамзита снижается более чем на 100 °C (см. табл. 2). Физико-механические показатели полученного керамзита приведены в табл. 3.

Рентгенофазовый состав керамзита исследовался на дифрактометре ДРОН-6 с использованием CoK_α-излучения при скорости вращения столика с образцом 1 град/мин. На рис. 1 представлена рентгенограмма исследуемого керамзита.

Таблица 3
Физико-механические показатели керамзита

Диаметр гранул, мм	5...9
Прочность при сжатии, МПа	2,2...2,5
Средняя плотность в куске, г / см ³	0,55...0,75
Насыпная плотность, кг / м ³	450...550

На рентгенограмме порошка отмечаются характерные интенсивные линии ($d/n = 0,185; 0,254; 0,342$ и $0,443$ нм) кварца, присутствие линии ($d/n = 0,192; 0,201$ и $0,403$ нм) обусловлено кристобалитом, линии ($d/n = 0,211; 0,220; 0,270; 0,376$ и $0,540$ нм) —

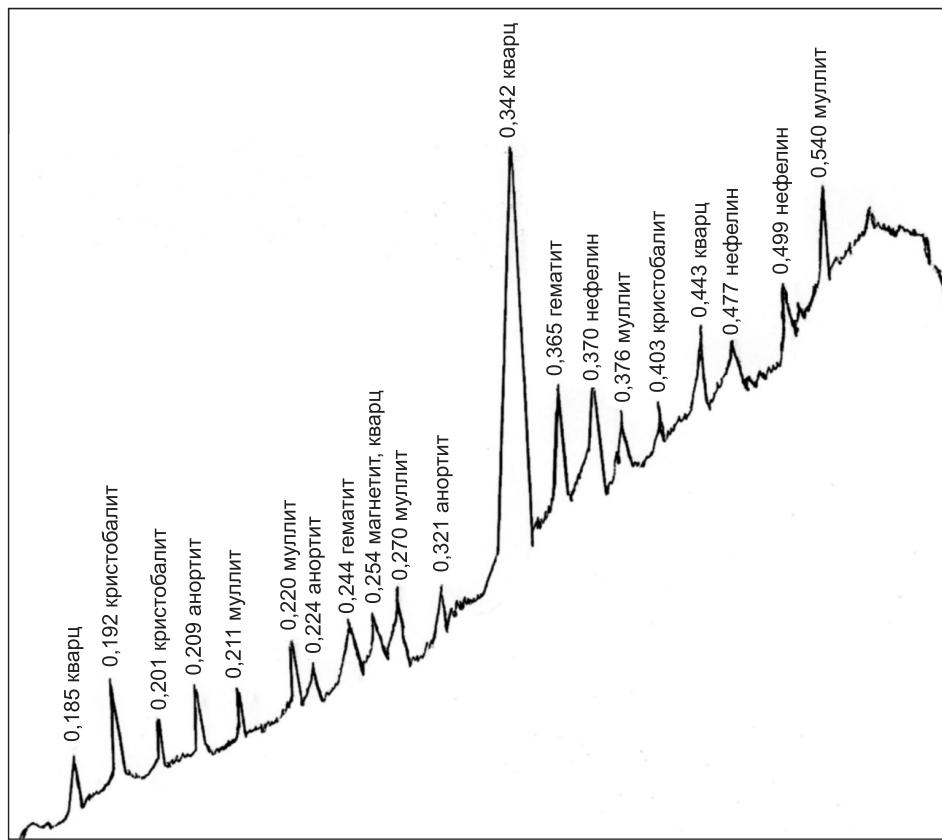


Рис. 1. Рентгенограмма керамзита

муллитом, ($d/n = 0,209; 0,224$ и $0,321$ нм) — анорититом, ($d/n = 0,244$ и $0,365$ нм) — гематитом, ($d/n = 0,370; 0,477$ и $0,499$ нм) — нефелином, ($d/n = 0,254$ нм) — магнетитом. О повышенном содержании стеклофазы в исследуемом керамзите свидетельствует соотношение интегральных площадей аморфного гало и дифракционных отражений на рентгенограммах. Как видно из рис. 1, при обжиге керамзита образуются новые минералы: кристобалит, аноритит, муллит, гематит, магнетит и нефелин.

Эффективность применения пористых материалов в качестве теплоизоляционных зависит, как известно, от распределения в них пористости. Усредненные значения распределения пористости в различных теплоизоляционных материалах приведены в табл. 4³. Видно, что наибольшей пористостью обладают «стеклопоровые» материалы.

Таблица 4
Распределение пористости
в теплоизоляционных материалах

Материал	Усредненные значения пористости, %		
	открытая	закрытая	общая
Газобетоны	34,5	21	55,5
Пенобетоны	24,5	32,75	57,25
МВИ	57,25	0,5	57,75
Перлитовые	42,75	15,5	58,25
Ячеистое стекло	5,75	54	59,75
Пенопласти	17,25	46,75	64,0
Стеклопоровые	43	21,75	64,75

³ Мизюряев С.А., Мамонов А.Н. Структура теплоизоляционных материалов // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика: Матер. 66-й Всерос. науч.-техн. конф. по итогам НИР ун-та за 2008 г. Самара: СГАСУ, 2009. С. 205–206.

Для производства волокнистых материалов необходимо использование либо природных сырьевых материалов, имеющих волокнистое строение, либо сложных технологий, требующих дорогостоящего оборудования, высоких температур и, как следствие, высоких энергозатрат, так как вытягивание волокон происходит из расплавов. Кроме того, эксплуатация волокнистых материалов зависит также от их увлажнения не только во время эксплуатации, но и в период их установки.

Хотя зернистые материалы с высокопористой структурой имеют преимущество перед волокнистыми как по характеристикам сырья, так и по преобладанию в их структуре закрытой пористости, но и они для изготовления формованных изделий требуют использования связующего, что приводит к повышению плотности, особенно при изготовлении изделий плотной структуры, и, как следствие, к ухудшению теплоизоляционных характеристик.

Поэтому одной из задач, стоящих перед разработчиками эффективных теплоизоляционных материалов, является оптимизация структуры материалов, т.е. создание структуры, в которой плотность всех составляющих была бы минимальна, а пористость была бы представлена мелкими закрытыми и равномерно распределенными порами.

Полученные гранулы керамзита из оптимального состава на основе отходов флотации углеобогащения, монтмориллонитовой глины и модифицированного жидкого стекла, на наш взгляд, отвечают таким требованиям (рис. 2, б).

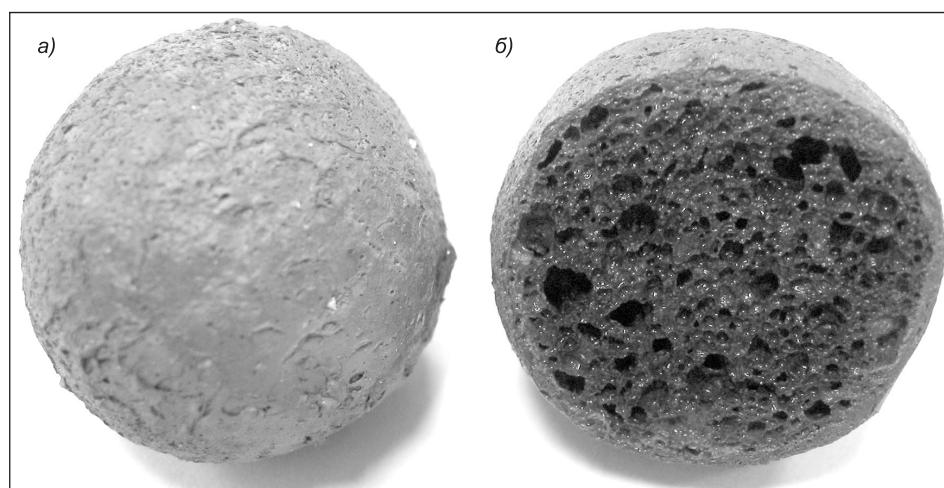


Рис. 2. Пористый заполнитель (керамзит): а) — общий вид; б) — в разрезе

Истинная пористость (общая) исследуемого керамзита находится в пределах 65–75 %, пористость кажущаяся (открытая) — до 65 %, а предельное значение закрытой пористости может достигнуть 20 %.

При одном и том же характере макроструктуры существенное влияние на физико-технические свойства керамзита могут оказывать размеры пор, распределение пор по размерам, степень их эллиптичности и т.д.⁴

Таким образом, как при исследовании свойств теплоизоляционных изделий с регулируемой пористостью и заданным комплексом физико-технических свойств, так и при их создании необходимо выбрать ме-

⁴ Павлов В.Ф. Физико-химические основы обжига изделий строительной керамики. М.: Стройиздат, 1977. 272 с.

тоды, дающие возможность наиболее полно и точно характеризовать макроструктуру керамзита.

Для исследования структуры пористости керамзита был использован метод растровой микроскопии. На рис. 3 представлена фотография поверхности скола исследуемого образца. В исследуемом керамзите имеют место преимущественно изолированные изометрические (иногда овальные) поры размером 3...10 мкм. Кроме того, сравнительно редко присутствуют крупные поры (до 40 мкм) овальной формы и изометрические поры типа «каналов». Именно эти поры, по всей видимости, определяют водопоглощение строительных материалов.

Исследования показали, что в изучаемом керамзите встречаются также узкие щелевидные поры и группы соединяющих пор весьма причудливой формы. Изометрические закрытые поры также присутствуют, но их значение в общей пористости структуры сравнительно невелико. Щелевидные поры, как правило, узкие (2...5 мкм), обычно изогнутые, серповидные, но иногда прямолинейные.

Многочисленными исследованиями показано, что распределение диаметров частиц фазы внедрения в матричных системах подчиняется логарифмически нормальному закону распределения [4]. Исходя из этого распределение пор по размерам, видимо, также можно описать логарифмически нормальным законом распределения, применив метод укрупненных показателей С.А. Салтыкова⁵. Формула логарифмически нормально-го закона распределения имеет следующий вид:

$$N_i = \frac{N\Delta}{\sqrt{2\pi(\ln D)}} \exp\left[-\frac{(\ln D^i - \bar{\ln D})^2}{2\sigma^2(\ln D)}\right]. \quad (1)$$

Здесь N_i — число пор i -й группы в 1 мм³ материала;

N — общее число пор всех размеров в 1 мм³ материала;

Δ — цена или шаг разбивки;

$\ln D$ — средний логарифм диаметров пор;

$\sigma(\ln D)$ — среднее квадратичное отклонение логарифмов диаметров пор;

D_i — диаметр пор i -й группы, мм.

Для определения величин, входящих в формулу (1), необходимо оценить общее число сечений (n) на единицу площади аншлифа, суммарный объем пор (ΣV) и суммарную поверхность пор (ΣS) в единице объема материала. Найти эти характеристики можно, используя микрофотографии. При этом n подсчитывается непосредственно, ΣV определяется линейным или точечным методом, ΣS — методом случайных секущих [4].

⁵ Салтыков С.А. О расчете кривой распределения размеров пространственных зерен // Завод. лаборатория. 1949. Т. 15, № 11. С. 1317–1319.

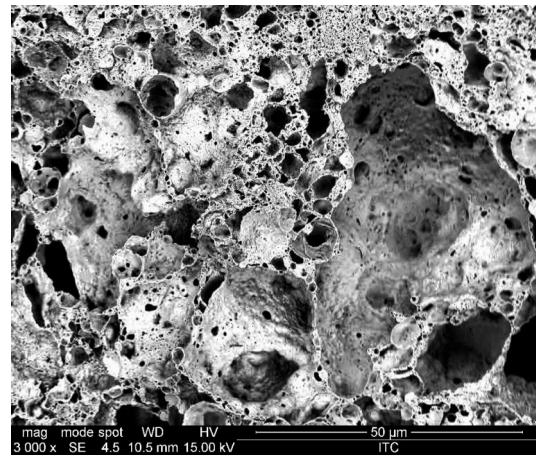


Рис. 3. Макроструктура поверхности скола керамзита. Увеличение × 3000

Общее число пор в единице объема определяется по формуле

$$N = 6\pi^2 \left(\frac{n}{\sum S} \right)^3 \sum V. \quad (2)$$

Средний диаметр пор:

$$\bar{D} = \frac{n}{N}. \quad (3)$$

Среднее квадратичное отклонение диаметров пор:

$$\sigma(D) = \sqrt{\frac{\sum S}{\pi N} - \bar{D}^2}. \quad (4)$$

Среднее квадратичное отклонение логарифмов диаметров пор:

$$\sigma(\ln D) = \sqrt{\ln \left[1 + \frac{\sigma^2(D)}{D^2} \right]}. \quad (5)$$

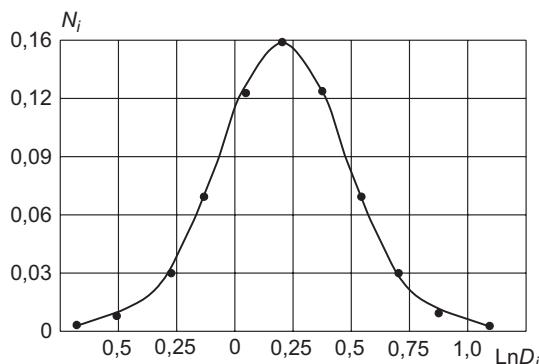


Рис. 4. Распределение пор по размерам в единице объема керамзита

Средний логарифм диаметров пор:

$$\ln \bar{D} = \ln \bar{D} - 0,5\sigma^2(\ln D). \quad (6)$$

При подстановке полученных результатов в формулу (1) вычисляется число пор каждой размерной группы в зависимости от их диаметра [4]. Распределение пор по размерам может быть выражено как в аналитической (7), так и в графической (как в нашем случае) форме (рис. 4).

$$N_i = 1,438 \Delta \exp \left[-\frac{(\ln D_i - 0,1612)^2}{0,1069} \right]. \quad (7)$$

Таким образом, применение метода укрупненных показателей С.А. Салтыкова дает возможность получить количественную оценку макроструктуры керамзита и в сочетании с физико-техническими его показателями позволяет объективно оценить комплекс свойств, которыми могут обладать пористые заполнители.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2362749 РФ, МПК C04B 14/24. Композиция для производства пористого заполнителя [Текст] / Д.Ю. Денисов, И.В. Ковков, В.З. Абдрахимов, Л.В. Журавль; заявитель и патентообладатель Самарский гос. ун-т ; заявл. 03.12.2007, опубл. 27.07.2009. Бюл. — 2009. — № 21.
2. Денисов, Д.Ю. Использование отходов флотации углеобогащения в производстве керамзита [Текст] / Д.Ю. Денисов, И.В. Ковков, В.З. Абдрахимов // Башк. хим. журн. — 2008. — Т. 15, № 2. — С. 107–109.
3. Абдрахимов, В.З. Изменение фазового состава керамзита из смышляевской глины Самарской области при различных скоростях охлаждения [Текст] / В.З. Абдрахимов // Строит. вестн. Рос. инж. акад. — 2009. — Вып. 10. — С. 18–22.

4. Давидович, Д.И. Методы исследования макроструктуры стеклокристаллических и минерализованных пен [Текст] / Д.И. Давидович, Д.Е. Павлов, Б.С. Черепанов // Научные исследования по повышению качества продукции строительной керамики : Тр. НИИстройкерамики. — М., 1979. — С. 99–107.

КУЛИКОВ В.А., асп.; E-mail: samarastroy@list.ru

Самарская академия государственного и муниципального управления

АБДРАХИМОВ В.З., д-р техн. наук, проф.; E-mail: 3375892@mail.ru

Самарская академия государственного и муниципального управления

КОВКОВ И.В., канд. техн. наук; E-mail: kovkoviv@mail.ru

Производственный кооператив «НАУКА», г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Получено после доработки 22.12.10

Kulikov V.A., post-graduate student; E-mail: samarastroy@list.ru

Samara Academy State and Municipal Management, Russia

Abdrahimov V.Z., doctor of technical sciences, professor; E-mail: 3375892@mail.ru

Samara Academy State and Municipal Management, Russia

Kovkov I.V., candidate of technical sciences; E-mail: kovkoviv@mail.ru

Production cooperative «SCIENCE», Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

EXPLORATION OF THE POROSITY OF THE EXPANDED CLAY ON THE BASIS OF COAL WASHING FLOTATION TAILINGS

Explorations have demonstrated that application of a method of the integrated parametres of S.A. Saltykova gives the chance to gain a quantitative assessment of a macroscopic structure of an expanded clay and in a combination to its physicotechnical parametres allows to size up objectively a complex of properties which one expanded aggregates can possess.

Key words: washery refuses, montmorillonite clay, expanded clay, porousness, pattern of porousness, a macroscopic structure, isometric pores, slotted pores.

REFERENCES

1. Patent 2362749 RF, МПК C04B 14/24. A composition for expanded aggregate production [Text] / D.Yu. Denisov, I.V. Kovkov, V.Z. Abdrahimov, L.V. Ghuravel; the applicant and patentee the Samara State University; declaration. 03.12.2007. Publ. 27.07.2009. Bul. — 2009. — N 21.
2. Denisov, D.Yu. Reclamation of coal preparation floatation in expanded clay production [Text] / D.Yu. Denisov, I.V. Kovkov, V.Z. Abdrahimov // Bashkir Chemical Magazine. — 2008. — Vol. 15, N 2. — P. 107–109.
3. Abdrahimov, V.Z. Alterations of a phase compound of expanded clay from montmorillonite clay of the Smyshljaevsky field of the Samara region at various cooling rates [Text] / V.Z. Abdrahimov // Building Bulletin of the Russian Engineering Academy. — 2009. — B. 10. — P. 18–22.
4. Davidovich, D.I. Macroscopic structure research techniques glassy-crystal and mineral froths [Text] / D.I. Davidovich, D.E. Pavlov, B.S. Cherepanov // Scientific explorations on improvement in quality of commodity of structural clay products : Proc. Institute NIIstroikeramiki. — M., 1979. — P. 99–107.

УДК 691.42.002.3

В.Д. КОТЛЯР

**НЕРАВНОПЛОТНОСТЬ КЕРАМИЧЕСКОГО ЧЕРЕПКА
КОМПРЕССИОННОГО ПРЕССОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ ОПОКОВИДНЫХ ПОРОД**

Изучено явление неравнотности керамического черепка компрессионного прессования при использовании в качестве сырья опоковидных пород. Показана взаимосвязь средней плотности и прочности. Предложены мероприятия по снижению неравнотности и повышению качества кирпича.

Ключевые слова: опоковидные породы, прессование, влажность, степень измельчения, пресс-порошок, неравнотность, обжиг.

Кремнистые опал-кристобалитовые опоковидные породы имеют широкое распространение во многих регионах России. Их характерной особенностью является наличие аморфного кремнезема и повышенная микропористость. Вещественный состав опоковидных пород изменяется в достаточно широких пределах. Выделяются типичные или нормальные опоки, с небольшим содержанием глинистой составляющей и карбонатов, опоки глинистые, карбонатные, глинисто-карбонатные и т.д. Различные литологические разновидности опок объединены общим термином — опоковидные породы.

Результаты исследований, проводимые в Ростовском государственном строительном университете на протяжении ряда последних лет, показали, что опоковидные породы — перспективное сырье для производства изделий стеновой керамики с улучшенными теплофизическими свойствами [1]. Разработанная нами классификация кремнистых опоковидных пород как сырья для производства стеновой керамики, основанная на особенностях вещественного состава и структуры, позволяет прогнозировать свойства получаемых изделий [2].

Результаты лабораторных и заводских испытаний показали, что для опоковидного сырья в силу особенностей технологических свойств наиболее приемлемым является полусухой способ прессования изделий и полусухой способ подготовки пресс-порошка. Измельчение сырья может осуществляться на щековых, молотковых дробилках, дезинтеграторах, стержневых мельницах до заданного фракционного состава — менее 1...3 мм. Влажность пресс-порошка на основе опок в силу микропористости изменяется в широких пределах — от 12 до 24 %. Как правило, интервал формовочной влажности для отдельных разновидностей опоковидных пород составляет 4–10 %. При этом всегда существует оптимальная влажность, при которой достигается максимальное уплотнение и соответственно максимальная прочность сырца и обожженных изделий. Цель данного исследования — изучение влияния степени неравнотности прессовок на физико-механические свойства образцов и обожженных изделий.

© Котляр В.Д., 2011

Один из недостатков полусухого прессования — неравномерность изделий, что существенно ухудшает физико-механические показатели. При прессовании часть усилия расходуется на преодоление трения порошка о стенки пресс-формы — внешнее трение и на преодоление трения между частицами пресс-порошка — внутреннее трение. Эта часть усилия не полностью передается нижней опорной поверхности (при одностороннем прессовании) и средней части (при двухстороннем прессовании) прессуемого тела, в связи с чем ближайшие к штампу слои пресс-порошка всегда испытывают большее давление, чем нижележащие. Неравномерное распределение давления, прежде всего, по сечению направления давления прессования, обусловливает разную степень уплотнения массы и, как следствие, различную плотность прессовок и керамического черепка. Вследствие этого керамический черепок обладает анизотропией, а его отдельные участки будут характеризоваться пониженными физико-механическими свойствами и морозостойкостью. Кроме того, участки прессовки с более низкой плотностью имеют, как правило, меньшую усадку. Это ведет к появлению внутренних напряжений, трещин. Перепады давления по высоте при прессовании полнотелого кирпича могут составлять 25–40 % [3, 4].

Разработанные многими авторами (В.А. Полюх, А.С. Бережной и др.) аналитические зависимости распределения давления по толщине прессовки всегда включают несколько параметров, которые определяются экспериментально и зависят от свойств конкретного пресс-порошка. Использование их предусматривает обязательное проведение экспериментов с конкретными пресс-порошками. Для выявления степени неравномерности при прессовании пресс-порошков на основе опоковидных пород нами был проведен комплекс экспериментов, для которых использовались опоки различных литологических разновидностей. Химический состав некоторых наиболее типичных месторождений приведен в таблице, а рентгенограммы представлены на рис. 1.

Главными породообразующими минералами опок являются: опал различной степени структурной упорядоченности, глинистые минералы, кварц, у карбонатных разностей — кальцит. Кальцит нельзя относить к вредным примесям, так как размер его зерен не превышает 0,1 мм. Глинистые минералы в основном представлены гидрослюдами, а также смешанослойными образованиями, находящимися в прочном контакте с опаловым кремнеземом.

Карбонатные разности содержат небольшую примесь цеолитов. Структура опок камневидная тонкопористая аморфно-пелитовая, в запечченных разновидностях алевритовая, полукриптокристаллическая, аморфно-пелитовая, органогенно-пелито-алевритовая. Опоки по химиче-

Химический состав опоковидного сырья, % по массе

Наименование месторождения опок и литологический вид	П.п.п.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Сумма
Сенгилеевское (малоглинистые)	4,80	80,1	6,80	4,17	1,45	0,71	0,22	1,14	0,35	99,74
Вольское (среднеглинистые)	4,41	79,41	8,03	3,82	1,03	1,05	0,35	1,29	0,42	99,81
Бакансое (карбонатные среднеглинистые)	8,57	68,28	8,24	4,24	6,26	1,55	1,05	1,10	0,25	99,54
Алексеевское (глинистые)	5,25	71,53	12,49	4,27	1,95	1,09	0,85	1,83	0,69	99,95

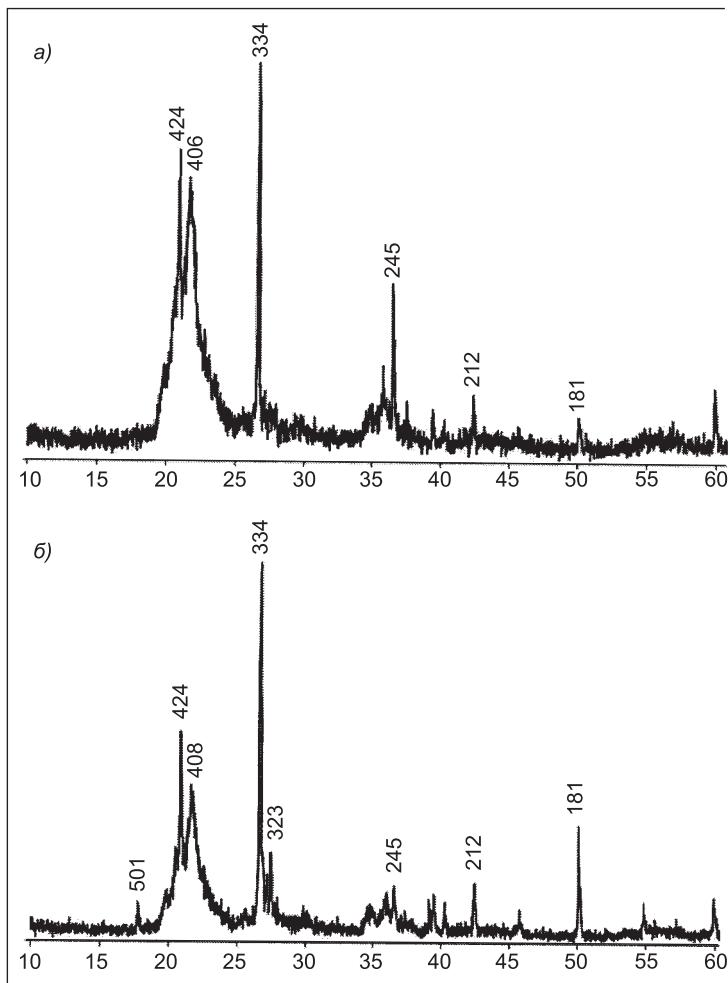
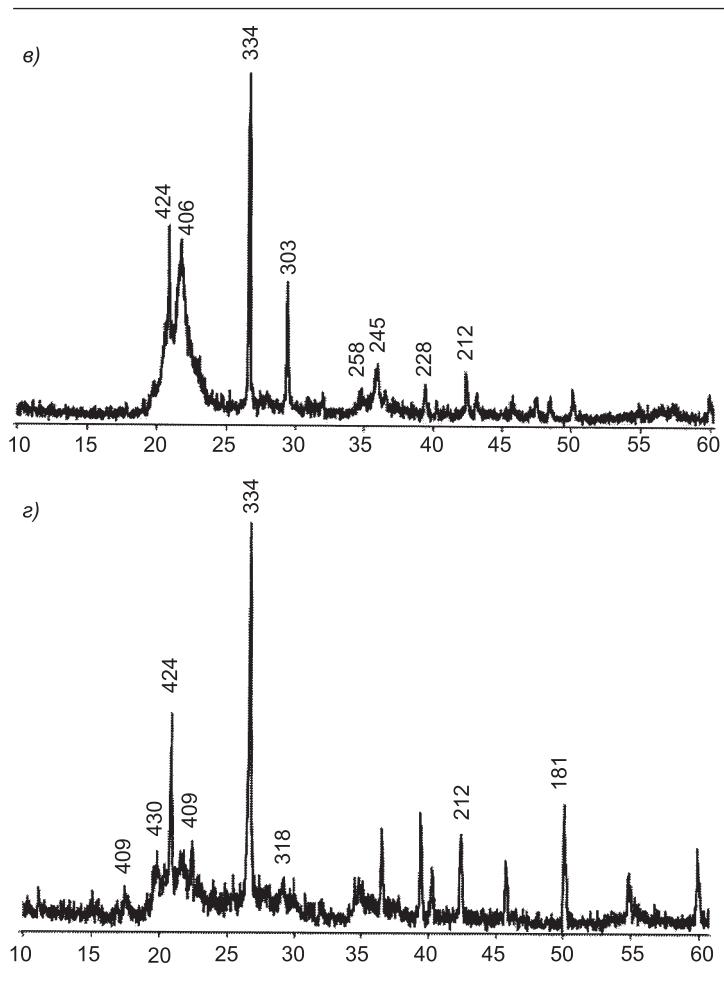


Рис. 1. Рентгенограммы опок: а) Сенгилеевского месторождения; б) Сеевского место

скому составу близки к суглинкам. Однако в суглинках основная часть кремнезема представлена в виде кварца, в опоках — в виде опала, опал-кристобалита. Опаловый кремнезем является гораздо более активным соединением в сравнении с кварцем, что предполагает его взаимодействие с другими минералами при более низких температурах. Опоки в отличие от суглинков не размокают в воде. Учитывая тонкопористую структуру опок, можно говорить, что керамический черепок на их основе будет иметь невысокую среднюю плотность — 1200...1600 кг / м³. А керамические массы на их основе будут иметь повышенное водосодержание. Высокая пористость также предполагает ускоренные режимы сушки отформованных сырцовых изделий на основе опок. Наличие гидрослюд, содержащих K₂O, предусматривает начало спекания при относительно низких температурах.

Подготовка пресс-порошка заключалась в равномерном увлажнении измельченного на щековых и молотковых дробилках сырья до необходимой влажности, просеивании через необходимое сито и вылеживании в течение 2 ч. Далее производилось прессование образцов на лабораторном 125-тонном прессе. Учитывая, что в настоящее время в основном применяется двухстороннее прессование, нами с двухсторонним приложением



б) Вольского месторождения; в) Баканского месторождения; г) Александровского месторождения

нагрузки прессовались образцы высотой 65 мм, что соответствует требованиям ГОСТ 530–2007 по высоте обычного кирпича. Затем образцы аккуратно распиливались на три части: высотой по 25 мм для верхней и нижней частей и 15 мм для средней части. Предварительно на цельных образцах определялись необходимые показатели. Также прессовались «трехслойные» образцы. Смысл их изготовления заключается в том, что между заранее рассчитанными порциями пресс-порошка устанавливаются прокладки из водонепроницаемой бумаги — кальки. Это позволяет после прессования получать легко отделяющиеся слои. Для контрольных испытаний изготавливались образцы-кирпичи стандартных размеров 250 × 120 × 65 мм.

Отпрессованные образцы подсушивали в течение суток при комнатной температуре. По истечении этого времени образцы осматривали, фиксировали все изменения внешнего вида и затем обжигали. Плотность прессовок в пересчете на твердую фазу определялась методом расчета и контролем высушенных образцов. Обжиг лабораторных образцов проводили в лабораторной электрической печи со средней скоростью подъема температуры 1–3 °C/мин и выдержкой при максимальной температуре 1,5–2 ч. Охлаждение от максимальной температуры до 100–150 °C про-

ходило в течение 10–14 ч. Определение водопоглощения, предела прочности образцов осуществлялось в соответствии с установленными методиками.

Для оценки степени неравнотности прессовок и керамического черепка используют как прямые методы — непосредственное определение средней плотности, так и косвенные — определение усадки по высоте образца, пористости, коэффициента уплотнения, расчетные методы и др. Нами использовался непосредственно прямой метод.

Результаты проведенных экспериментов позволили выявить определенные закономерности. Роль давления для достижения равнотности черепка прессования возрастает, когда увеличивается влажность пресс-порошка, и значимым этот фактор становится при влажности, соответствующей почти пластическому течению массы. Причина этого заключается в том, что с увеличением давления одновременно растут и абсолютные значения сил внутреннего и внешнего трения, т.е. действуют факторы, препятствующие перераспределению материала в объеме прессовки. Из этого следует вывод, подтвержденный на практике: повышение прессового давления без устранения других причин не позволяет получать равномерные прессовки, если только порошки не обладают повышенной влажностью. Влажность пресс-порошка является наиболее существенным фактором, влияющим на равнотность. Наблюдается четкая закономерность — с увеличением формовочной влажности уменьшается неравнотность как прессовок, так и обожженных образцов. В приемлемых интервалах формовочной влажности, которая для опок различных литологических разновидностей может составлять от 12 до 24 %, неравнотность прессовок достигает 4,2 %.

На рис. 2 на примере опоки Алексеевского месторождения, измельченной до фракции 0–2,5 мм, показано различие в плотности средней и крайних частей обожженных образцов в зависимости от влажности пресс-порошка при давлении прессования 25 МПа. Плотности нижней и верхней частей образцов практически идентичны. На практике при внимательном рассмотрении кирпича полусухого прессования всегда можно наблюдать, что средняя часть кирпича по высоте всегда имеет менее плотную структуру и выделяется визуально. Эта часть кирпича показывает всегда меньшую твердость и соответственно прочность. И с большой долей вероятности можно предполагать, что именно прочностные свойства средней части кирпича определяют прочность изделия в целом при отсутствии других дефектов.



Рис. 2. Влияние влажности пресс-порошка на разнотность обожженных образцов
1 — крайние части образцов; 2 — средняя часть образцов

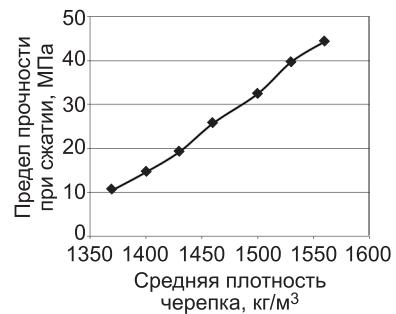


Рис. 3. Зависимость между средней плотностью и прочностью образцов

Для оценки влияния степени неравнотности керамического черепка и изделия в целом на прочностные свойства был проведен комплекс экспериментов для выявления взаимосвязи между средней плотностью и пределом прочности при сжатии. Для этого прессовались образцы при различном давлении прессования (от 10 до 40 МПа) и различной влажности пресс-порошка. Как установлено, при увеличении давления прессования в указанном диапазоне предел прочности при сжатии образцов увеличивается на 50–400 %, а средняя плотность — на 5–8 % в зависимости от влажности. При повышении формовочной влажности до определенного максимума предел прочности при сжатии и изгибе увеличивается на 40–300 %, при этом средняя плотность возрастает на 1,5–10,8 % в пересчете на твердую фазу. При суммарном влиянии давления прессования и влажности пресс-порошка изменения средней плотности прессовок и черепка могут достигать 15–20 %.

Как показали результаты исследований, при увеличении (уменьшении) средней плотности черепка на 1 % предел прочности при сжатии для различных литологических разновидностей опоковидных пород, обожженных при одной температуре, изменяется на 8–38 %. Учитывая, что неравнотность может достигать пяти и более процентов, очевидно, что достаточно значительное повышение прочности может быть достигнуто именно за счет максимальной равнотности черепка. На рис. 3 в качестве примера приведены зависимости между средней плотностью и пределом прочности при сжатии образцов, полученных на основе опоки Алексеевского месторождения и обожженных при температуре 1000 °C.

Как видно, изменение соотношения между приростом прочности и плотности в заданных интервалах носит линейный характер, и для каждого вида сырья и выбранных технологических факторов нетрудно вывести определенные коэффициенты. Если принять линейную функцию, то зависимость прочности от плотности может быть выражена формулой (1) при максимальной ошибке 6,43 и среднеквадратичном отклонении 4,53. Если принять квадратичный вид функции, зависимости могут быть выражены формулой (2) при максимальной ошибке 4,95 и среднеквадратичном отклонении 3,51:

$$Y = 5,4376537X + 1,3193334e + 3; \quad (1)$$

$$Y = -0,0246429X^2 + 6,7901251X + 1,3042264e + 3. \quad (2)$$

Безусловно, полученные данные носят в какой-то мере относительный характер. В каждом случае необходимо учитывать особенности вещественного состава и особенности спекания конкретного опоковидного сырья, также фактор снижения плотности за счет разложения карбонатов в карбонатных разновидностях, различные технологические факторы и т.д. Однако полученные данные показывают общие тенденции влияния неравнотности черепка при полусухом прессовании на прочностные характеристики. И это должно учитываться при испытаниях сырья, пусконаладочных работах и оптимизации технологических параметров производства. На первый взгляд повышение средней плотности черепка нежелательно, поскольку при этом ухудшаются теплотехнические свойства. Однако если учитывать соотношения между приростом плотности и прочности, становится очевидным, что это целесообразно для стеновых

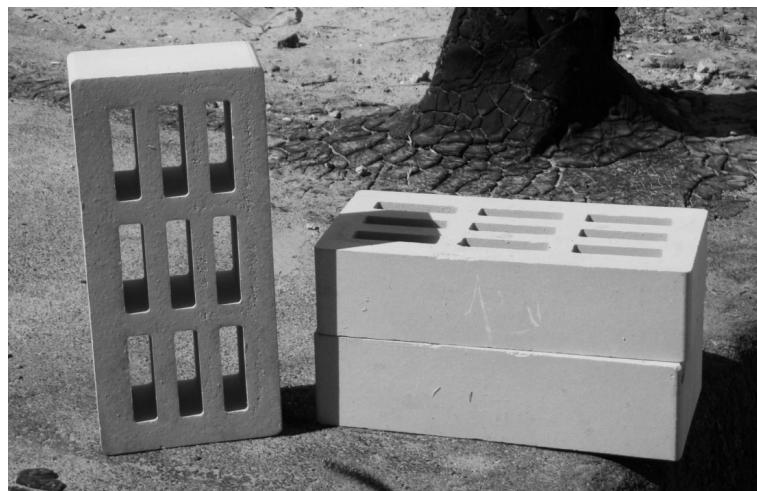


Рис. 4. Керамический пустотелый кирпич компрессионного прессования на основе опок

изделий, так как для получения изделий с маркой по прочности 125–150 и выше и пустотностью 25–35 % предел прочности черепка должен быть не менее 20...25 МПа. Также в каждом конкретном случае необходимо определять наиболее эффективные мероприятия для снижения неравнодействующей — повышение формовочной влажности, ввод ПАВ для снижения внутреннего и внешнего трения при прессовании, изменение параметров прессования и т.д. В реальных производственных условиях это может дать значительное повышение марки изделий по прочности и морозостойкости.

Выявленные закономерности были использованы в ходе мероприятий по повышению качества кирпича на Новочеркасском кирпичном заводе, используя в качестве сырья карбонатные разновидности опок. За счет улучшения прессуемости, повышения равнодействующей получен кирпич с пустотностью 30 % (рис. 4), маркой по прочности М150 и 175, средней плотностью 1000...1100 кг/м³, отвечающий требованиям по морозостойкости и имеющий привлекательный желтый цвет.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Котляр, В.Д. Опоки — перспективное сырье для стеновой керамики [Текст] / В.Д. Котляр, Б.В. Талпа // Строительные материалы. — 2007. — № 2. — С. 31–33.
2. Котляр, В.Д. Классификация кремнистых опоковидных пород как сырья для производства стеновой керамики [Текст] / В.Д. Котляр // Строительные материалы. — 2009. — № 3. — С. 24–27.
3. Лундина, М.Г. Производство кирпича методом полусухого прессования [Текст] / М.Г. Лундина, Э.А. Беренштейн, Г.С. Блох. — М. : Стройиздат, 1958. — 164 с.
4. Попильский, Р.Я. Прессование порошковых керамических масс [Текст] / Р.Я. Попильский, Ю.Е. Пивинский. — М. : Металлургия, 1983. — 176 с.

КОТЛЯР В.Д., канд. техн. наук, доц.
Ростовский государственный строительный университет

Получено после доработки 30.11.10

Kotlyar V.D., doctor of technical sciences, assistant professor, Rostov State Civil Engineering University, Russia

DIFFERENT DENSITY A CERAMIC POTSHERD COMPRESSION PRESSING ON THE BASIS OPOKING BREEDS

The phenomenon different density a ceramic crock compression pressing at use as raw materials opoking breeds is studied. The interrelation of average density and durability is shown. Actions for decrease different density and to brick improvement of quality are increase.

K e y w o r d s : opoking breeds, pressing, humidity, crushing degree, a press powder, different density, roasting.

REFERENCES

1. Kotlyar, V.D. Opoki — perspective raw materials for wall ceramics [Text] / V.D. Kotlyar, B.V. Talpa // Building materials. — 2007. — N 2. — P. 31–33.
 2. Kotlyar, V.D. Classification siliceous opoking breeds as raw materials for manufacture wall ceramics [Text] / V.D. Kotlyar // Building materials. — 2009. — N 3. — P. 24–27.
 3. Lundina, M.G. Manufacture of a brick a method of moist pressing [Text] / M.G. Lundina, E.A. Berenshtejn, G.S. Bloh. — M. : Stroyizdat, 1958. — 164 p.
 4. Popilsky, R.Ya. Pressing of powder ceramic weights [Text] / R.Ya. Popilsky, Yu.E. Pivinsky. — M. : Metallurgy, 1983.—176 p.
-

УДК 691.42.004.8

А.Ю. СТОЛБОУШКИН, Г.И. БЕРДОВ

**РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ КОМПЛЕКСНАЯ ПЕРЕРАБОТКА
МИНЕРАЛЬНОГО ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ
В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Представлены разработанные схемы комплексной переработки отходов углеобогатительных фабрик и отходов предприятий по обогащению железных руд. По результатам экспериментальных исследований и опытно-промышленных испытаний установлено, что после разделения отходов на фракции тонкодисперсная малоуглеродистая часть отходов углеобогащения и шламистая силикатная часть отходов обогащения железных руд могут быть использованы в качестве основного компонента (до 70...80 мас. %) для производства высококачественного керамического кирпича.

Ключевые слова: техногенные месторождения, отходы углеобогащения, отходы обогащения железных руд, тонкодисперсный шлам, минеральное техногенное сырье.

Промышленность строительных материалов является наиболее емкой отраслью из всех потенциальных потребителей промышленных отходов, поскольку их большая часть (неорганические отходы) состоит преимущественно из силикатов и алюмосиликатов кальция и магния. Однако, несмотря на широкие возможности применения, в отрасли используется не более 10 % от годового образования отходов. Совершенно другая картина складывается за рубежом, например, в Англии и Германии из техногенных отходов производится порядка 30 млн т нерудных строительных материалов ежегодно, в то же время в России — около 100 тыс. т.

Таким образом, комплексная переработка минерального техногенного сырья в производстве строительных материалов позволит не только значительно расширить сырьевую базу отрасли, но и будет способствовать решению проблем охраны окружающей среды и улучшению экологической обстановки. Следует отметить также социальный аспект решения данного вопроса, учитывая возможную переориентацию производства для моногородов.

Начиная с 2000 г. в отечественном недропользовании был введен термин «техногенные месторождения». Он определяет их как скопления минеральных веществ на поверхности земли или в горных выработках, образовавшиеся в результате отделения от массива и складирования в виде отходов горного, обогатительного, металлургического и других производств и пригодные по количеству и качеству сырья для промышленного использования¹.

Наибольшее количество техногенных ресурсов в России расположено в Северо-Западном, Центральном, Уральском, Сибирском и Дальневосточном федеральных округах. Особенno сложная обстановка, связанная с преизбыточным накоплением техногенных отходов, складывается в Кемеровской области. Кузбасс занимает первое место в России по количеству образующихся отходов: 1,9 млрд т в год при общем образовании в России

¹ Термины и понятия отечественного недропользования: словарь-справочник / А.И. Кривцов, Б.И. Беневольский, В.М. Минаков, И.В. Морозов / Под ред. Б.А. Яцкевича. М., 2000. 344 с.

3,8 млрд т (по данным Министерства природных ресурсов и экологии за 2008 г.). Накопления отходов, занимающие площадь более 40 тыс. га, превышают 20 млрд т. Нагрузка складируемых отходов на единицу площади в Кемеровской области составляет 13 600 т/км², в Новокузнецке — 21 700 т/км² при среднероссийском показателе 146 т/км² [1].

Крупнейшими техногенными образованиями Кузбасса являются объекты размещения отходов горно-металлургического комплекса и энергетики: хранилища железорудных отходов Абагурской (АОАФ) (площадь более 400 га, количество накопленных отходов — более 100 млн т) и Мундыбашской (МОФ) (около 200 га, 49 млн т) обогатительных фабрик; шламонакопитель Западно-Сибирского металлургического комбината (ЗСМК) (более 300 га и 90 млн т); шлаковые отвалы Новокузнецкого металлургического комбината и ЗСМК (более 50 га и 80 млн т) и т.д.

На кафедре архитектуры и строительных материалов Сибирского государственного индустриального университета разработана и предложена к проектированию схема комплексной переработки отходов углеобогатительных фабрик, входящих в металлургический комплекс Кузбасса (рис. 1).

Основным показателем, определяющим область и способ применения углеотходов, является содержание в них углерода. Наибольшее количество угля (10–30 %) содержится в отходах флотации, наименьшее

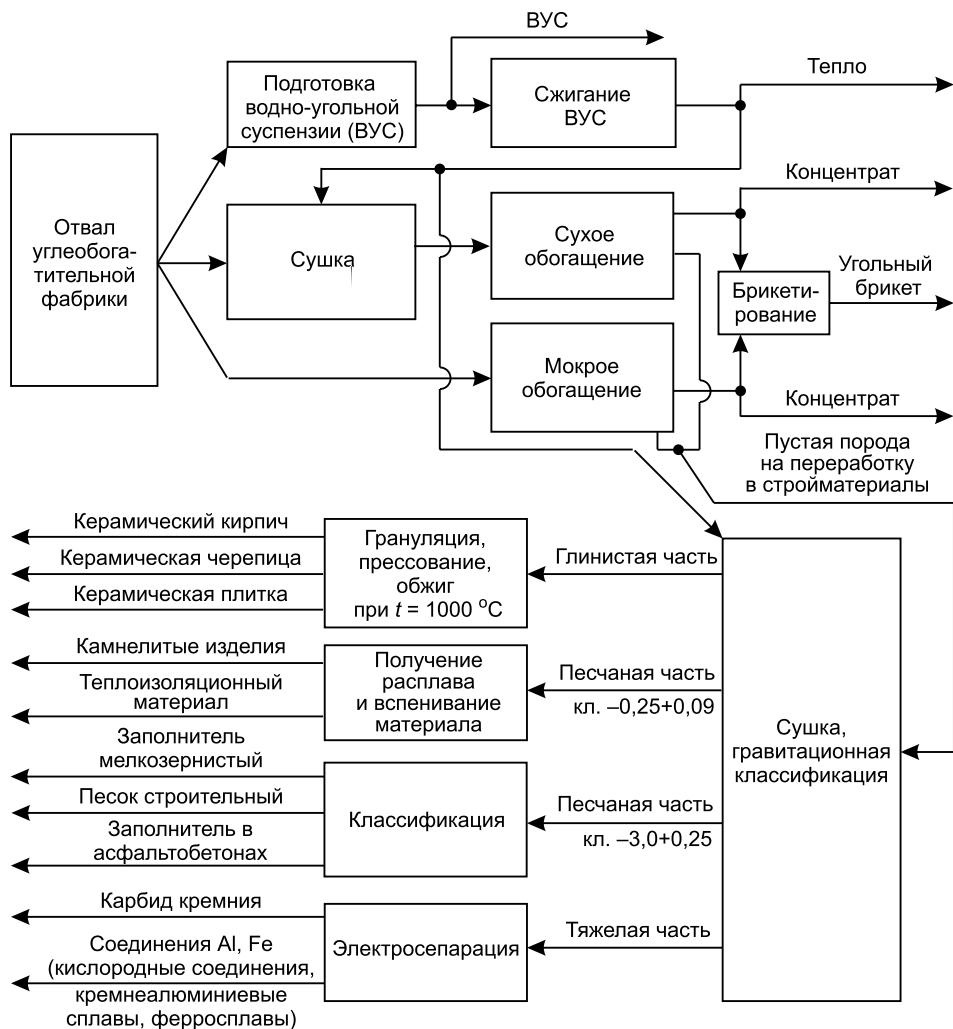


Рис. 1. Схема комплексной переработки отходов углеобогатительных фабрик

(4–7 %) — в отходах фракций 20...150 мм. Отходы углеобогащения по содержанию углерода условно можно разделить на две группы. Первую группу, с содержанием углерода более 24 %, целесообразно дополнительно обогащать и применять как топливо. Вторую, с содержанием углерода менее 24 %, использовать в производстве строительных материалов и металлургической промышленности.

На практике, в отвалах углеобогатительных фабрик, разброс содержания углерода в отходах достаточно велик, поэтому предлагается их сухое или мокрое обогащение в зависимости от естественной влажности с последующей переработкой «пустой породы». Тонкодисперсная фракция углеотходов после гравитационной классификации в измельчительно-сепарационной установке может быть использована для получения керамики. В частности, разработана и апробирована в промышленных условиях ресурсосберегающая технология производства керамического кирпича марки 150 на основе отходов углеобогащения. Благодаря использованию различных способов активации компонентов шихты (механоактивации, термоактивации, грануляции и др.) получена рациональная структура керамического черепка [2].

Авторами проведены исследования и разработана принципиально новая ресурсо- и энергосберегающая технология переработки железорудных отходов (хвостов) Абагурской и Мундыбашской обогатительных фабрик [3].

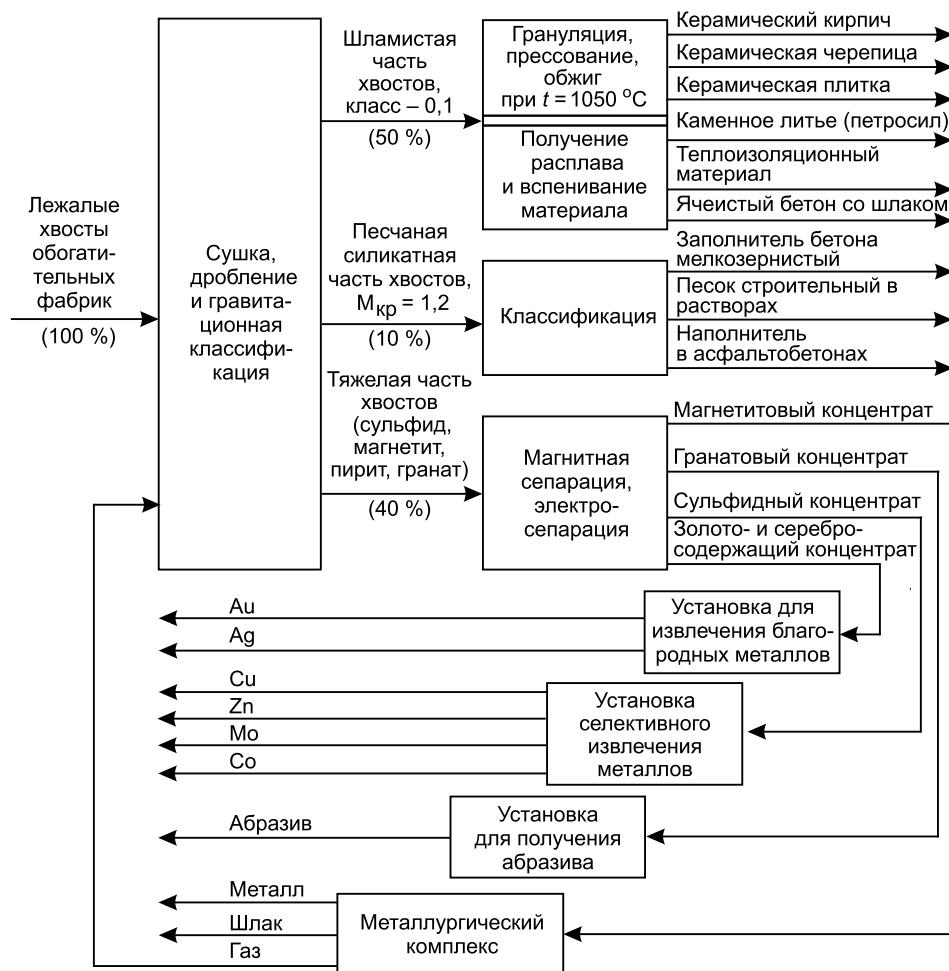


Рис. 2. Схема комплексной переработки железорудных отходов обогатительных фабрик

Разделение лежальных хвостов из отвалов рудообогатительных фабрик основано на методе сухого обогащения (рис. 2). На первой стадии путем гравитационной классификации отходов в потоке теплоносителя выделяются три вида промпродуктов: тяжелый металлсодержащий концентрат, силикатная песчаная фракция и шламистая часть. Дальнейшая переработка тяжелой части хвостов позволит производить магнетитовый, гранатовый, сульфидный и золото-серебросодержащий концентраты. Для получения металлов предлагаются высокотемпературные технологии на базе струйно-эмulsionного энергометаллургического агрегата типа СЭР и нанотехнологии селективного извлечения металлов². Дисперсная силикатная фракция может быть использована в производстве мелкозернистого заполнителя для бетонов, песка и наполнителя для асфальтобетонных смесей. На основе шламистой части железорудных отходов разработана технология керамического матричного композита с ячеисто-заполненной структурой³.

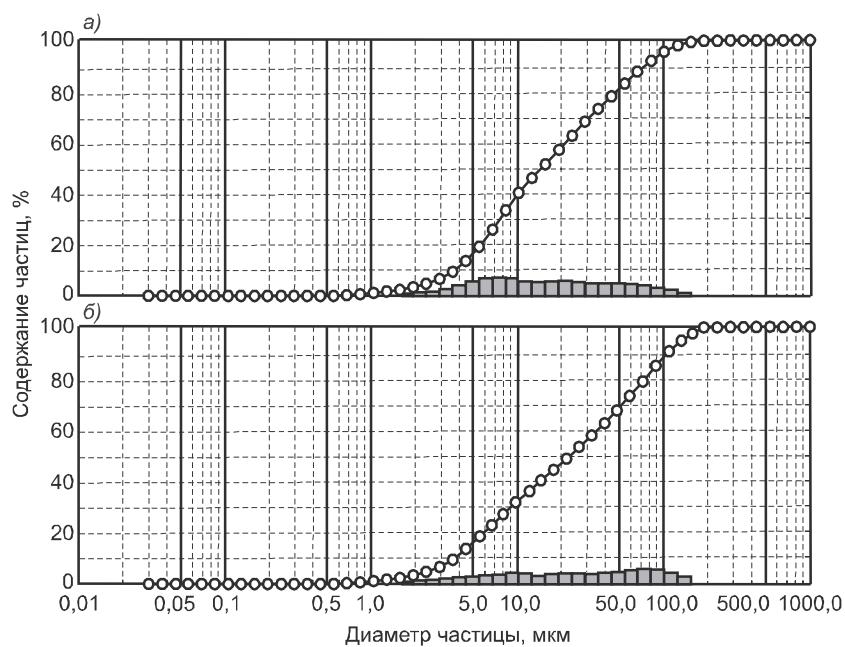


Рис. 3. Дисперсный состав шламистой части железорудных отходов Абагурской (а) и Мундыбашской (б) обогатительных фабрик

Дисперсный состав шламистой части отходов обогащения железных руд представлен на рис. 3. Средний размер частиц отходов составляет 15...18 мкм, удельная поверхность, измеренная адсорбционным методом, равна 12 м²/г. По гранулометрическому составу отходы можно отнести к пылеватой супеси. Химический состав шламистой части железорудных хвостов приведен в табл. 1. В результате анализа установлено, что по химическому составу отходы практически попадают в зону сырья, пригодного для производства керамического кирпича, на диаграмме промышленного назначения глин (по А.И. Августиннику).

² Цымбал В.П., Мочалов С.П. О новых способе и агрегате переработки природно-легированных руд и получения металлов // Металлы Евразии. 2006. № 6. С. 78–80.

³ Столбоушкин А.Ю. Особенности формирования структуры керамического матричного композита из гранулированных шихт // Изв. вузов. Строительство. 2008. № 11–12. С. 25–32.

Таблица 1
Химический состав шламистой части отходов обогащения железных руд

Наименование	Содержание оксидов, в % на сухое вещество												
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	S	P ₂ O ₅	MnO	П.п.п.
Шламистая часть отходов АОАФ	34,99	8,99	13,99	5,70	14,97	11,88	0,40	0,75	0,36	1,45	0,24	0,59	10,90
Шламистая часть отходов МОФ	33,23	9,80	12,36	4,85	23,87	5,59	0,41	0,86	0,35	1,14	0,56	1,36	10,26

Комплексный фазовый анализ показал, что в качестве основных порообразующих минералов в состав шламистой части хвостов входят (в порядке убывания) гранаты, карбонаты, хлорит, амфиболы, пирит, пироксены, полевые шпаты, кварц и гематит.

Исследование формовочных, сушильных и обжиговых свойств шламистых железорудных отходов показало, что по числу пластичности техногенное сырье находится на границе групп малопластичного и непластичного керамического сырья (влажность на пределе текучести 30,4 %, на границе раскатывания — 26,1 %). Максимальная молекулярная влагоемкость хвостов составляет 23,6 %, относительная формовочная влажность массы 28,7 %. Сырец мало чувствительно к сушке с относительно небольшой воздушной линейной усадкой (6,2 %).

При изучении обжиговых свойств установлено, что температура деформации (вспучивания) отходов 1250 °C. При обжиге ниже указанной температуры материал практически не имеет спекшегося состояния (условно за температуру начала спекания можно принять 1100 °C, после которой происходит резкое снижение водопоглощения). В результате интервал спекания составляет 1100...1200 °C. Шламистая часть хвостов по огнеупорности относится к легкоплавкому, по температуре и степени спекания — к высокотемпературному и неспекающемуся керамическому сырью. Огневая усадка материала при 1000 °C находится в пределах 1,0–1,2 %.

В результате, учитывая особенности дисперсного, химического и минерального составов шламистой части хвостов, можно заключить, что для формирования пространственно-организованной структуры и спекания керамического черепка из отходов необходимо введение глины (20–25 мас. %) и корректирующих добавок — плавней (2–5 мас. %).

В качестве добавки глинистого сырья использован местный новокузнецкий суглинок. Суглинок — умеренно пластичный, низкодисперсный, с низким содержанием крупных и средних включений, относится к легкоплавкому, низкотемпературному, сильноспекающемуся сырью. По минерологическому составу соответствует группе полиминеральных глин каолинит-монтмориллонит-гидрослюдистого типа.

В качестве корректирующей добавки плавня был использован оксид ванадия (+5). В силикатных стеклообразующих системах оксид V₂O₅ выполняет функцию плавня. Оксид ванадия V₂O₅ превосходит все другие оксиды элементов со степенью окисления +5 по способности снижения температуры размягчения стекол. При обжиге оксид ванадия в совокупности с шламистой частью отходов обогащения железных руд способствует снижению температуры размягчения щелочных силикатных стекол с повышенным содержанием оксидов железа, что обуславливает интен-

сификацию процесса спекания и значительное повышение прочности при сжатии образцов.

В экспериментах для прессования образцов использовался пресс-порошок, в котором последовательно изменялось содержание добавки V_2O_5 в количестве от 0 до 5 мас. %. Влажность пресс-масс составляла 9–10 %, давление прессования 18...20 МПа. Методом двухступенчатого прессования с односторонним приложением нагрузки изготовлены шесть серий образцов-цилиндров диаметром 45 мм и высотой 45...50 мм. Обжиг проводился при 1050 °C

с изотермической выдержкой при максимальной температуре в течение 90 мин. Результаты испытаний приведены в табл. 2 как средние значения из трех измерений.

На рис. 4 показано влияние добавки оксида ванадия на предел прочности при сжатии, среднюю плотность и водопоглощение керамических образцов на основе шламистой части отходов обогащения железных руд. Увеличение процентного содержания добавки приводит к снижению водопоглощения и росту значений средней плотности и прочности керамических образцов, причем интенсивность влияния добавки резко возрастает при ее содержании выше 4 мас. %.

Таблица 2
Физико-механические свойства керамических образцов полусухого прессования с добавкой оксида ванадия

шламистая часть отходов	Состав шихты, %			Водопоглощение, %	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность при сжатии, МПа
	суглиник новокузнецкий	оксид ванадия (V_2O_5)	—			
80	20	—	17,9	1807	13,9	
79	20	1	16,3	1873	15,9	
78	20	2	15,1	1927	21,7	
77	20	3	12,2	1968	33,2	
76	20	4	10,8	2005	59,4	
75	20	5	7,59	2259	127,6	

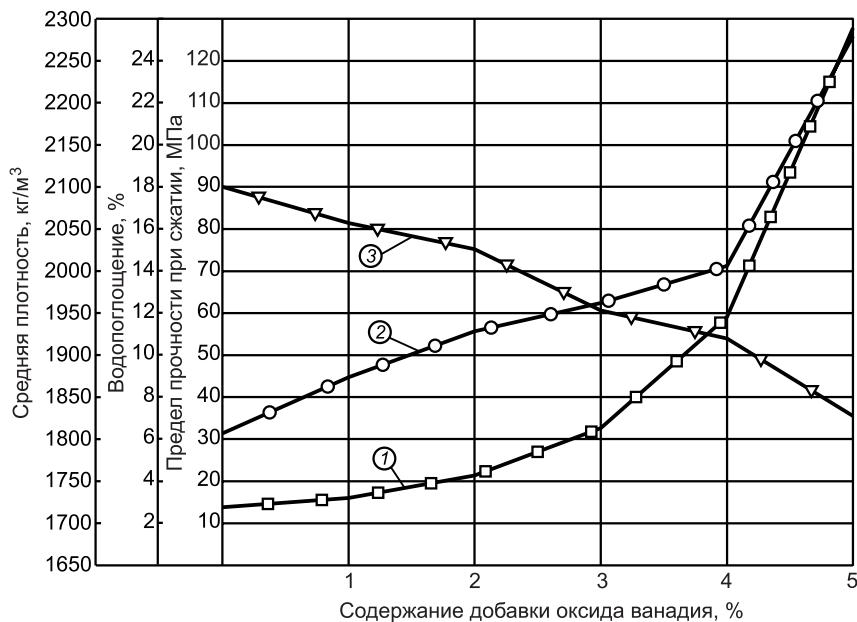


Рис. 4. Влияние добавки оксида ванадия на прочность при сжатии (1), среднюю плотность (2) и водопоглощение (3) керамических образцов на основе шламистой части железорудных отходов

Исследование микроструктуры керамического черепка из шламистой части железорудных хвостов показало, что в теле образца (рис. 5, а) имеются отдельные агрегаты частиц и неагрегированные частицы, склеенные аморфизованными прослойками. С введением в состав шихты оксида ванадия в количестве 2 мас. % происходит образование и внутреннее насыщение материала пиропластичной связкой, объединяющей агрегаты и отдельные частицы в единую систему (рис. 5, б). Увеличение количества добавки до 5 мас. % приводит к образованию стекловидных расплавов в обжигаемых изделиях уже при 700 °С и последующему их интенсивному развитию по мере возрастания температуры обжига до 1050 °С. Пиропластичная фаза разъедает частицы хвостов, вовлекая новые порции твердого вещества в расплав, и обеспечивает практически полное спекание керамического черепка с образованием монолитной стеклокристаллической структуры (рис. 5, в, г). В итоге прочность керамических образцов резко возрастает, превышая 120 МПа.

Техническая новизна результатов исследований подтверждена положительным решением Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (Роспатента) о выдаче патента на изобретение за № 2009129691 /03(041360) от 19.04.2010 г., которое относится к производству строительных материалов и может быть использовано в технологии изделий стеновой и строительной керамики, в частности кирпича, камней, черепицы, плитки и т.п.

Внедрение предлагаемой технологии позволит выпускать лицевой и декоративный керамический кирпич полусухого прессования, соответствующий ГОСТ 530–2007 «Кирпич и камни керамические», для марок 150–200 с различными оттенками коричневого цвета.

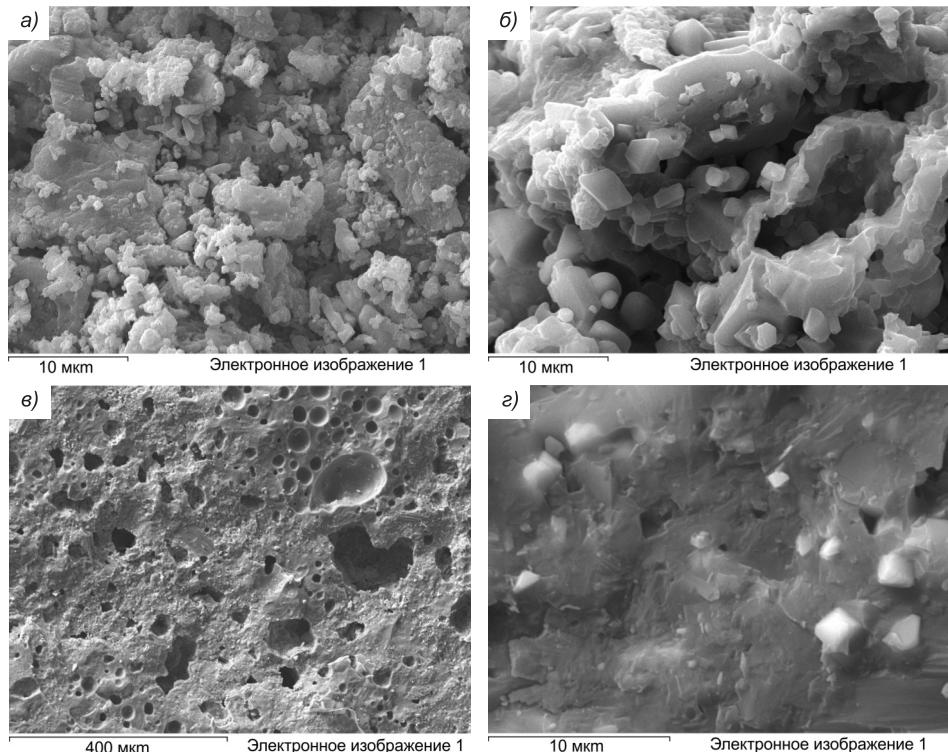


Рис. 5. Изображение структуры керамических образцов на основе шламистой части железорудных отходов с добавкой оксида ванадия под сканирующим электронным микроскопом

Количество добавки, мас. %: а — 0; б — 2; в, г — 5

Необходимость масштабной комплексной переработки минерального техногенного сырья назрела давно. Приведенные в статье отходоемкие технологии производства строительных материалов позволяют значительно расширить сырьевую базу отрасли и повысить экологическую безопасность промышленных регионов в России и за рубежом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Волынкина, Е.П. Развитие концепции управления отходами в металлургии [Текст] / Е.П. Волынкина // Экобюллетень ИНЭКА. — 2007. — № 4 (123). — С. 45–50.
2. Столбушин, А.Ю. Формирование рациональной структуры керамических изделий полусухого прессования из минеральных отходов Кузбасса [Текст] / А.Ю. Столбушин, С.В. Дружинин, Г.И. Стороженко, В.Ф. Завадский // Строительные материалы. — 2008. — № 5. — С. 95–97.
3. Мочалов, С.П. Инновационные технологии строительных материалов в структуре комплексной переработки железорудных отходов Мундыбашской обогатительной фабрики [Текст] / С.П. Мочалов, Н.И. Шатилов, А.Ю. Столбушин и др. // Строительный Кузбасс. — 2010. — № 1–2. — С. 24–27.

СТОЛБОУШКИН А.Ю., канд. техн. наук, доц.

Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк

БЕРДОВ Г.И., д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

Получено после доработки 03.12.10

Stolboushkin A.Yu., candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian State University of Industry, Novokuznetsk, Russia

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

RESOURCE-SAVING SCHEMES OF COMPLEX PROCESSING OF MINERAL TECHNOGENIC RAW MATERIAL IN BUILDING MATERIALS MANUFACTURE

The developed schemes of complex processing of waste from coal-cleaning plants and wastes from iron-ore enrichment enterprises are presented. The conducted experimental researches and experimental-industrial tests have proved that after waste division into fractions fine-dispersed low-carbon part of the coal-enrichment waste and slime silicate part of the waste products of iron-ore enrichment can be used as a basic component (up to 70–80 mass. %) for manufacture of high-quality ceramic bricks.

Key words: technogenic deposits, coal-enrichment waste, waste products of iron-ore enrichment, fine-dispersed slime, mineral technogenic raw material.

REFERENCES

1. Volinkina, E.P. Conception development of waste management in metallurgy [Text] / E.P. Volinkina // Ecobulletin of IEA. — 2007. — N 4 (123). — P. 45–50.
2. Stolboushkin, A.Yu. Formation of rational structure of ceramics of dry pressing from Kuzbass mineral waste [Text] / A.Yu. Stolboushkin, S.V. Druzhinin, G.I. Storozhenko, V.F. Zavadsky // Building materials. — 2008. — N 5. — P. 95–97.
3. Mochalov, S.P. Innovative technology of building materials in the structure of complex processing of iron-ore waste from Mundybash concentrating factory [Text] / S.P. Mochalov, N.I. Shatilov, A.Yu. Stolboushkin et al. // Building Kuzbass. — 2010. — N 1–2. — P. 24–27.

УДК 667.637:699.81:624.014

С.В. АФАНАСЬЕВ, И.В. КУЗЬМИН

КОМПОЗИЦИОННЫЕ ОГНЕЗАЩИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МЕТАЛЛОКОНСТРУКЦИЙ

Предложены огнезащитные составы вспучивающего действия для металлоконструкций, включающие металлофосфат, отвердитель, ионогенное ПАВ и загуститель, причем в качестве загустителя используются измельченное базальтовое волокно, стеклянные микросферы или другие материалы, проявляющие теплоизоляционные свойства.

Ключевые слова: металлоконструкция, металлофосфатная композиция, огнезащитный состав вспучивающегося типа, теплоизолирующие свойства, огнезащитная эффективность.

Одним из наиболее прогрессивных направлений в строительстве следует считать замену тяжелых железобетонных и кирпичных конструкций на более легкие металлические. Однако широкому внедрению указанных материалов в большинстве случаев препятствует их низкая огнестойкость [1].

В соответствии с действующей нормативно-технической документацией огнезащита необходима прежде всего для сохранения несущей способности и целостности металлоконструкций при воздействии на них высоких температур в условиях реального пожара.

По мнению специалистов, этим требованиям наиболее полно соответствуют металлофосфатные огнезащитные композиции благодаря их высокой эффективности и оптимальному соотношению цена–качество.

При разработке огнезащитных составов большинство исследователей придерживается правила, согласно которому в состав огнезащитной композиции должны входить пленкообразователь, отвердитель, смачиватель, загуститель и вспученный агент [2]. В частности, предложенный в [3] способ изготовления огнезащитного состава предусматривает смешение алюмохромфосфата, неионогенного ПАВ и полиамина, предварительно нейтрализованного ортофосфорной кислотой до pH 6,0...8,8, причем в качестве полиамина рекомендовано использовать водный раствор продукта общей формулы



где $n = 0,1$ и $m = 0,1$ при следующем массовом соотношении компонентов: алюмохромфосфат : неионогенное ПАВ : полиамин, равном (20–90) : (0,1–0,5) : (10–80).

При обработке изделий из древесины данный огнезащитный состав обеспечивает их перевод в первую группу огнезащитной эффективности. К его недостаткам могут быть отнесены повышенная скорость отверждения, зависящая от температуры окружающей среды, а также невысокая вязкость композиции, затрудняющая получение огнезащитных слоев повышенной толщины. В результате оптимизации огнезащитного состава авторам [4] удалось существенно улучшить его свойства. Осуществленное ими

© Афанасьев С.В., Кузьмин И.В., 2011

рецептуростроение предусматривает смешение металлофосфатного пленкообразующего и композиции, включающей отвердитель, ионогенное ПАВ и преобразователь ржавчины «НОТЕХ». В качестве отвердителей могут быть использованы огнезащитный состав для древесины марки «ОСА-1», аминный модификатор АМ-1, аминоспирты и другие аминосоединения при следующем соотношении ингредиентов, мас. %: металлофосфат : отвердитель : ионогенное ПАВ : «НОТЕХ», равном (40–90) : (5–30) : (0–15) : (0–20).

С целью повышения вязкости указанной композиции и снижения количества наносимых слоев наряду с металлофосфатным пленкообразующим, отвердителем «ОСА-1» и ионогенным ПАВ в состав включен загуститель, проявляющий теплоизолирующие свойства.

В качестве пленкообразующих использовали алюмофосфат и алюмохромфосфат, синтезированные определенным образом¹ (табл. 1).

Таблица 1
Характеристика металлофосфатных связующих

Характеристика	Алюмофосфат	Алюмохромфосфат
Содержание алюминия в пересчете на Al_2O_3 , мас. %	9,0...12,5	6,6...9,0
Содержание хрома в пересчете на Cr_2O_3 , мас. %	—	3,5...4,5
Содержание фосфатов в пересчете на P_2O_5 , мас. %	32...37	35...39
Плотность, г / cm^3	1,55...1,70	1,60...1,75

Способ получения огнезащитного состава «ОСА-1»² предусматривает конденсацию карбамидоформальдегидного концентрата (состав, мас. %: карбамид 21–25, формальдегид 54–60, вода — остальное) с аммиачной водой, взятых в эквимолярном отношении по формальдегиду и аммиаку. Нагрев осуществляется в слабощелочной среде в присутствии моноэтаноламина, добавляемого совместно с аммиачной водой в количестве 0,15 мас. % в расчете на карбамидоформальдегидный концентрат, с последующим вводом 5,2 мас. % карбамида в расчете на 100 мас. % карбамидоформальдегидного концентрата. Затем реакционная смесь охлаждается и нейтрализуется ортофосфорной кислотой до pH 6,7.

Отвердитель марки ОСА-1 имел следующие показатели качества:

Наличие свободного формальдегида	Отсутствие
pH	6,7
Коэффициент рефракции	1,412
Плотность при 20 °C	1,18 г / cm^3
Температура замерзания	-15 °C

В качестве ионогенного ПАВ использовали пенообразователь ПО-6 ТС марок А и Б, вырабатываемый отечественной промышленностью по ТУ 0258-147-05744685 и являющийся водным раствором триэтанолами-

¹ Пат. 2187478 РФ, кл. C04 B12/02. Способ получения алюмофосфатного связующего / В.Н. Махлай, С.В. Афанасьев, М.А. Барышева, А.С. Виноградов; заявитель и патентообладатель ОАО «Тольяттиазот», заявл. 20.08.2002; опубл. 05.07.2004. Бюл. 2003. № 23.

² Пат. 2270752, РФ, кл. B27K 3/52, C09K 21/12. Способ получения антиpirена / В.Н. Махлай, С.В. Афанасьев, М.П. Михайлин, Р.В. Коротков; заявитель и патентообладатель ОАО «Тольяттиазот», заявл. 12.10.2004; опубл. 27.02.2006. Бюл. 2006. № 32.

новых солей первичных алкилсульфатов. Их содержание в использованном продукте составляло 30 мас. %.

Оценка теплоизолирующих свойств огнезащитных покрытий проводилась по методике, разработанной ВНИИПО. Сущность метода заключается в определении времени нагрева необогреваемой стороны образца металлической пластины до критической температуры 500 °С в процессе испытаний, которые проводятся при температурном режиме согласно ГОСТ 12.1.004–89.

Параметры огнезащиты металлоконструкций определяли по НПБ 236–97 «Огнезащитные составы для стальных конструкций. Общие требования. Методы определения огнезащитной эффективности».

Наилучшим комплексом свойств обладает огнезащитная композиция, включающая алюмофосфатное или алюмохромфосфатное пленкообразующее, отвердитель ОСА-1, ионогенное ПАВ и загуститель. В качестве последнего могут использоваться базальтовое волокно, микросфера или их смесь при следующем соотношении ингредиентов, мас. %: пленкообразующее : отвердитель : ионогенное ПАВ : загуститель, равном (50–75) : (10–30) : (3–10) : (1–20) (табл. 2).

В ходе проведенного исследования установлено, что при смешении указанных реагентов образуется суспензия, содержащая низкомолекулярную карбамидоформальдегидную смолу, металлофосфат и загуститель. В процессе ее дальнейшего отверждения формируются надмолекулярные структуры, склонные к вспучиванию при высокой температуре за счет отщепления низкомолекулярных соединений — воды, углекислого газа, аммиака и формальдегида.

Таблица 2
Свойства огнезащитных составов

Ингредиент	Данные [4]	Разработанные составы				
		1	2	3	4	5
<i>Состав, мас. %</i>						
Алюмохромфосфат	—	—	—	65,0	73,6	—
Алюмофосфат	71,4	63,8	57,7	—	—	73,3
ОСА-1	21,4	19,1	17,3	17,0	18,3	10,2
Ионогенное ПАВ ПО-6ТС марки В	7,2	6,5	5,8	8,0	7,0	3,0
Загуститель:						
— базальтовое волокно*	—	10,6	—	3,3	1,1	8,9
— микросфера марки МСВП-50**	—	—	19,2	6,7	—	4,6
<i>Свойства композиции</i>						
Количество слоев для получения толщины покрытия в 1 мм	Два	Один				
Время достижения критической температуры в 500 °С на необогреваемой поверхности при толщине покрытия 1 мм, мин	18,1	18,4	18,3	18,5	18,6	18,2
Предел прочности на сжатие***	1	1,12	1,20	1,10	1,07	1,11
Группа огнезащитной эффективности НПБ-238-97	III					

* Измельченные супертонкие волокна диаметром 3 мкм и длиной 50...100 мкм.

** Стеклянные микросфера с диаметром 20...160 мкм, аппретированные γ-амино-пропилтриэтоксисиланом.

*** Отношение предела прочности отверженного состава к прототипу.

Действительно, при добавлении к кислому металлофосфату отвердителя и ПАВ pH смеси устанавливается на более высоком уровне, чем у металлофосфата, что вызывает быструю сшивку фосфатных групп с образованием пространственной сетки. С другой стороны, при pH ниже 7 компоненты огнезащитного состава «ОСА-1» вступают в реакцию поликонденсации с образованием карбамидоформальдегидной смолы. Этому благоприятствует наличие в его составе различных метилолмочевин, склонных к конденсации в кислой среде с образованием смолообразных продуктов. Роль ионогенного ПАВ состоит в улучшении смачиваемости поверхности материала (древесины, металла) антиприреном.

Достоинством предлагаемого огнезащитного состава является его способность к вспучиванию при повышенных температурах. Это обусловлено внутримолекулярными перегруппировками в отвердителе и металлофосфатном пленкообразующем, сопровождающимися отщеплением низкомолекулярных веществ, преимущественно воды. Протекание данного процесса подтверждено различными физико-химическими методами, в том числе и результатами термического анализа. Интенсивное порообразование и подъем огнезащитного слоя препятствуют воздействию открытого огня и теплового излучения на верхние слои древесины или металлоконструкции.

Выводы. 1. В результате проведенных исследований были разработаны огнезащитные композиции на металлофосфатной основе с заданным комплексом свойств.

2. Согласно методике НПБ 236-97 разработанные металлофосфатные огнезащитные композиции для несущих металлических конструкций отнесены к третьей группе огнезащитной эффективности.

3. Показано влияние загустителя в виде базальтового волокна и микросфер на огнезащитную эффективность металлофосфатных огнезащитных композиций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Веренкова, Э.М. Огнезащитные фосфатные покрытия [Текст] / Э.М. Веренкова, Б.П. Гусев, В.С. Сорин // Изв. вузов. Строительство. — 1998. — № 8. — С. 135–143.
2. Афанасьев, С.В. Алюмофосфатные композиции для огнезащиты металлоконструкций [Текст] / С.В. Афанасьев, И.В. Кузьмин // Актуальные проблемы пожарной безопасности : Тез. докл. XXI Междунар. науч.-практ. конф. — Ч. 1. — М. : ВНИИПО, 2009. — С. 215.
3. Пат. 2277046 РФ, кл. B27K 3/52, C09K 21/10. Способ получения огнезащитного состава [Текст] / С.В. Афанасьев, В.Н. Махлай, М.П. Михайллин, Р.В. Коротков; заявитель и патентообладатель ОАО «Тольяттиазот». — № 2004138134 ; заявл. 27.12.2004 ; опубл. 27.05.2006. Бюл. № 16.
4. Пат. 2339671 РФ, МПК A 62 D 1/00. Способ получения огнезащитного состава [Текст] / С.В. Афанасьев, В.Н. Махлай, А.А. Триполицын, И.В. Кузьмин; заявитель и патентообладатель ОАО «Тольяттиазот». — № 2007127235/04 ; заявл. 16.07.2007 ; опубл. 27.11.2008. Бюл. № 33.

АФАНАСЬЕВ С.В., д-р техн. наук, проф.; E-mail: staf77@mail.ru
Тольяттинский военный технический институт
КУЗЬМИН И.В., асп.; E-mail: korotkovroman01@yandex.ru
Тольяттинский военный технический институт

Получено после доработки 7.12.10

Afanasiev S.V., doctor of technical sciences, professor; E-mail: staf77@mail.ru, Toliyatinskij Military Technical Institute, Russia

Kuzmin I.V., post-graduate student, engineer; E-mail: korotkovroman01@yandex.ru,
Toliyattinskiy Military Technical Institute, Russia

COMPOSITE FIRE-PROTECTIVE MATERIAL FOR METALLIC CONSTRUCTION

The offered fire-protective compositions widening in volume actions for metallic construction, including phosphate of the metal, harden, ionize superficially active material and thicken moreover as thicken are used pulverized basalt filament, glass micro sphere or the other material, showing heat insulating characteristic.

Key words: metallic construction, metal phosphate composition, fire-protective composition widening in volume of the type, heat insulating characteristic, fire-protective efficiency.

REFERENCES

1. Verenkova, E.M. Fire-protective phosphate covering [Text] / E.M. Verenkova, B.P. Gusev, V.S. Sorin // News of Higher Education Institutions. Construction. — 1998. — N 8. — P. 135–143.
2. Afanasiev, S.V. Aluminophosphate compositions for the metalwork [Text] / S.V. Afanasiev, I.V. Kuzmin // Current Issues of Fire Protection : Proc. Thesis of the XXI Intern. Scientific and Practical Conf. — Pt 1. — M. : Fire Safety Research Institute, 2009. — P. 215.
3. Patent 2277046 RF, kl. V27K 3/52, S09K 21/10. The way of the reception fire-protective composition [Text] / S.V. Afanasiev, V.N. Makhlay, M.P. Mihaylin, R.V. Korotkov ; Proposer and patent to possess «Toliyattiazot». — 2004138134 ; has declared. 27.12.2004 ; publ. 27.05.2006. Byul. 16.
4. Patent 2339671 RF, MPK A 62 D 1/00. The way of the reception fire-protective composition [Text] / S.V. Afanasiev, V.N. Makhlay, A.A. Tripolicyn, I.V. Kuzmin ; Proposer and patent to process «Toliyattiazot». — 2007127235/04; has declared. 16.07.2007 ; publ. 27.11.2008. Byul. 33.

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.9:536.001.24

О.Д. САМАРИН, С.С. АЗИВСКАЯ

ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ПОМЕЩЕНИЯ, ОБСЛУЖИВАЕМОГО АВТОМАТИЗИРОВАННЫМИ СИСТЕМАМИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОКЛИМАТА

Рассмотрены процессы нестационарного теплообмена в помещении, обслуживаемом автоматизированными системами обеспечения микроклимата. Описана постановка задачи расчета нестационарного теплового режима такого помещения и предложен алгоритм решения данной задачи численными методами с помощью ЭВМ. Приведен пример результатов расчета, получаемых с использованием такого алгоритма, и дан их анализ.

Ключевые слова: тепловой режим, уравнение теплопроводности, граничные условия, система автоматического регулирования, обратная связь, метод конечных разностей, явно-неявная схема.

При проектировании автоматизированных систем вентиляции и кондиционирования воздуха (СВ и КВ) необходим расчет нестационарного теплового режима обслуживаемого помещения с учетом автоматического регулирования СВ и КВ и переходных процессов в их оборудовании, связанных с изменением параметров наружного и внутреннего воздуха с течением времени.

При этом сама СВ и КВ и система ее автоматического регулирования (САР) образуют для помещения отрицательную обратную связь по каналу «теплопоступления $Q_{возд}$ – t_b », так как входной информацией для их работы является величина отклонения температуры внутреннего воздуха t_b от заданного среднего уровня (уставки), а результатом их действия — тепловой поток Q_{per} , который добавляется к $Q_{возд}$, полностью или частично компенсируя его и внося, таким образом, дополнительное стабилизирующее воздействие в систему «помещение — СВ и КВ — САР» [1].

Поскольку поступающая в помещение теплота, как конвективная, так и лучистая, в той или иной степени ассимилируется массивными ограждающими конструкциями, для расчета его переменного теплового режима необходимо решение системы уравнений теплопроводности в каждом таком ограждении. Дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности для одномерного случая выглядит следующим образом [2]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \quad (1)$$

Здесь $t(x, \tau)$ — температура, К (или °C), в плоскости внутри соответствующего ограждения с координатой x , м, в момент времени τ , с; a — коэффициент температуропроводности материала ограждения, $\text{м}^2/\text{с}$;

$a = \lambda / cp$, где λ — теплопроводность материала, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, c и ρ — его удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, и плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Для решения уравнения (1) при наблюдающемся в помещениях сочетании конвективного и лучистого теплообмена необходимо использовать смешанные граничные условия второго и третьего рода, связывающие интенсивность теплообмена на поверхности ограждения с градиентом температуры в его массиве. В частности, для внутренней поверхности, если ось x направлена внутрь конструкции, соответствующее выражение можно записать так:

$$-\lambda_{\text{в}} \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{\text{в}} = q_{\text{л.в}} + \alpha_{\text{к.в}} (t_{\text{в}} - t_{\text{пов}}). \quad (2)$$

Здесь $t_{\text{пов}}$ — температура внутренней поверхности ограждения, $^{\circ}\text{C}$; $\lambda_{\text{в}}$ и $\alpha_{\text{к.в}}$ — соответственно теплопроводность материала у этой поверхности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, и коэффициент конвективного теплообмена на ней, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;

$t_{\text{в}}$ — температура воздуха в помещении, $^{\circ}\text{C}$;

$q_{\text{л.в}}$ — плотность лучистого теплового потока, падающего на внутреннюю поверхность, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

В первом приближении ее можно принять как отношение лучистой составляющей теплопоступлений $Q_{\text{л.возм}}$ к суммарной площади поверхностей, обращенных в помещение. Аналогичное соотношение можно составить и для наружной поверхности, но в этом случае индексы «в» у используемых переменных следует заменить на «н». Хотя обычно в этом случае лучистая и конвективная составляющие теплового потока не разделяются, и записывается условие только третьего рода при $q_{\text{л.н}} = 0$, а вместо $\alpha_{\text{к.н}}$ используется коэффициент полного теплообмена $\alpha_{\text{н}}$. Его значение для холодного периода года в соответствии с действующими в РФ нормативными документами чаще всего принимается равным $23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

На стыке материальных слоев внутри конструкции используется граничное условие четвертого рода, выражающее непрерывность температурного поля и плотности потока теплоты. Оно записывается следующим образом:

$$t_1(x) = t_2(x), \quad \lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x}, \quad (3)$$

где t_1 и t_2 — температура материалов на стыке слоев в плоскости с координатой x ;

λ_1 и λ_2 — теплопроводность материалов соприкасающихся слоев, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

В рассматриваемом алгоритме система уравнений (1) с граничными условиями (2) и (3) для каждого массивного ограждения помещения решается с помощью разработанной авторами программы для ЭВМ на алгоритмическом языке Fortran методом конечных разностей. При этом используется смешанная явно-неявная схема повышенной точности [2], позволяющая получить аппроксимацию порядка $h^4 + \Delta\tau^2$, где h и $\Delta\tau$ — соответственно размер шага по пространственной координате и по времени. В результате мы получаем для следующего, $j+1$ -го, временного слоя значения температуры по сечению каждой ограждающей конструкции. После этого новая величина $t_{\text{в}}$ определяется по формуле (4), следующей из общего уравнения теплового баланса помещения [3]:

$$t_{\text{в},j+1} = \frac{Q_{\text{к.возм}} + Q_{\text{к.пер}} + \sum \alpha_{\text{к.в}} F_m t_{\text{пов},j+1} + (\sum K F_l + L c_{\text{в}} \rho_{\text{в}}) t_{\text{н}}}{\sum K F_l + \sum \alpha_{\text{к.в}} F_m + L c_{\text{в}} \rho_{\text{в}}}. \quad (4)$$

Здесь t_h — температура наружного воздуха, °C;
 L — неорганизованный воздухообмен в помещении, $\text{м}^3/\text{s}$, т.е. расход инфильтрующегося наружного воздуха;
 c_b и ρ_b — соответственно удельная теплоемкость, Дж/(кг · К), и плотность, кг/ м^3 , этого воздуха;
 $\Sigma K F_l$, Вт/К, — сумма произведений коэффициентов теплопередачи K_l , Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$), наружных «легких» ограждений помещения (условно безынерционных, например, окон) на их площади F_l , м^2 ;
 F_m — площадь массивных ограждений, м^2 ;
 $t_{\text{пов},j+1}$ — температура на их внутренних поверхностях (1-й слой изнутри помещения по пространственной координате) для $j+1$ -го момента времени, °C;
 $Q_{k,\text{возм}}$ и $Q_{k,\text{рег}}$ — соответственно текущее значение конвективного теплового потока от внутренних теплоисточников в помещении и автоматически регулируемой системы обеспечения микроклимата, Вт.

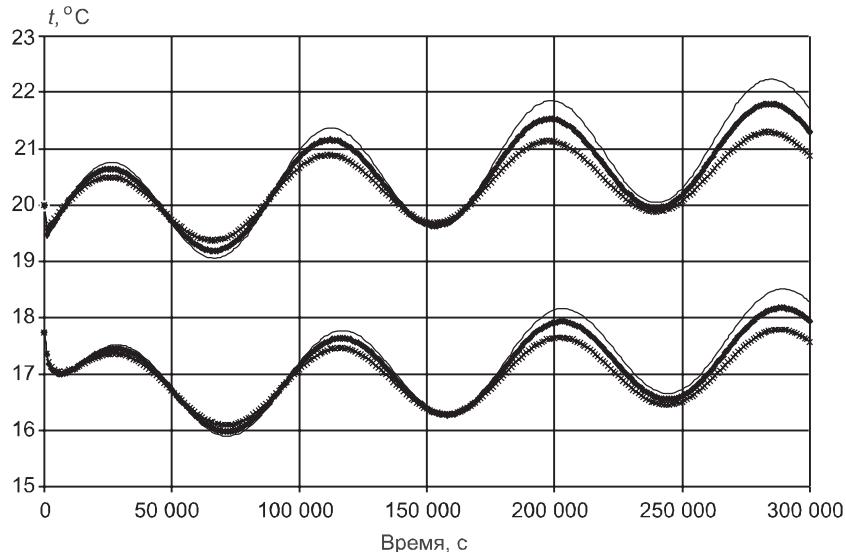
Если данная система создает лучистый тепловой поток, его плотность учитывается в условии (2) дополнительно к потоку от внутренних источников.

Для $Q_{\text{рег}}$, как конвективного, так и лучистого, используется уравнение отрицательной обратной связи:

$$Q_{\text{рег}} = -K_{\text{рег}}(t_{b,j} - t_{b,0}). \quad (5)$$

По своему физическому смыслу коэффициент передачи $K_{\text{рег}}$, Вт/К, показывает в данном случае, на сколько ватт нужно изменять величину $Q_{\text{рег}}$ при отклонении t_b от уставки $t_{b,0}$ на 1 К. Такое изменение и должна обеспечить соответствующим образом подобранная САР.

В качестве примера на рисунке показано полученное по результатам расчетов с помощью описанного алгоритма изменение t_b и $t_{\text{пов}}$ при гармонических колебаниях теплопоступлений и различной величине $K_{\text{рег}}$: 50 Вт/К (тонкие линии), 100 Вт/К (жирные) и 200 Вт/К (с крестиками). При этом были использованы следующие значения основных параметров: $\Sigma K F_l = 4$ Вт/К; $L c_b \rho_b = 14$ Вт/К; $\alpha_{k,b} = 3,7$ Вт/($\text{м}^2 \cdot \text{К}$); $\Sigma F_m = 74 \text{ м}^2$; $t_h = -28$ °C; $t_{b,0} = +20$ °C; амплитуда колебаний $Q_{k,\text{возм}}$ равна 280 Вт; $Q_{l,\text{возм}}$ — 100 Вт. Теплофизические параметры материальных сло-



Зависимость t_b (верхние линии) и $t_{\text{пов}}$ (нижние линии) от времени при периодических теплопоступлениях

ев массивных ограждений принимались в соответствии с действующими в РФ рекомендациями. Из графика видно, что зависимость температуры от времени также имеет гармонический характер, причем амплитуда колебаний уменьшается с увеличением регулирующего воздействия. Это подтверждает предположение, что общая теплоустойчивость системы «помещение — СВ и КВ — САР» складывается из показателя теплопоглощения помещения и управляющего воздействия САР [4].

Таким образом, мы получили методику, позволяющую оценить влияние автоматического регулирования СВ и КВ на нестационарный тепловой режим обслуживаемого помещения и принимать необходимые решения по устройству и функционированию данных систем. Методика достаточно проста и допускает дальнейшее совершенствование за счет учета дополнительных факторов, влияющих на рассматриваемые процессы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калмаков, А.А. Автоматика и автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции [Текст] / А.А. Калмаков и др. — М. : Стройиздат, 1986. — 479 с.
2. Леонтьев, А.И. Теория тепломассообмена [Текст] / А.И. Леонтьев и др. — М. : Изд-во МГТУ, 1997. — 684 с.
3. Богословский, В.Н. Строительная теплофизика [Текст] / В.Н. Богословский. — М. : Высш. шк., 1982. — 415 с.
4. Самарин, О.Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность [Текст] / О.Д. Самарин. — М. : Изд-во АСВ, 2009. — 296 с.

*САМАРИН О.Д., канд. техн. наук, доц.
Московский государственный строительный университет
АЗИВСКАЯ С.С., асп.
Московский государственный строительный университет*

Получено 13.12.10

Samarin O.D., candidate of technical sciences, assistant professor, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Azivskaya S.S., post-graduate student, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

PRINCIPLES OF CALCULATION OF NON-STEADY THERMAL REGIME OF A ROOM SERVED BY AUTOMATED MYCROCLIMATE SYSTEMS

The processes of non-steady heat exchange in the room served by automated microclimate systems are reviewed. The formulation of calculation of a non-steady thermal mode of such room is described, and the algorithm of the solution of the given problem by the numerical methods with the help of a computer is offered. The example of outcomes of calculation received with usage of such algorithm is adduced and their analysis is given.

Key words: thermal mode, heat conduction equation, boundary conditions, system of automatic control, feedback, method of finite differences, obvious-implicit scheme.

REFERENCES

1. Kalmakov, A.A. Automatics and automation of heat and gas supply and ventilation systems [Text] / A.A. Kalmakov et al. — M. : Stroyizdat, 1986. — 479 p.
2. Leontyev, A.I. Theory of heat and mass exchange [Text] / A.I. Leontyev et al. — M. : MSTU Publ., 1997. — 684 p.
3. Bogoslovsky, V.N. Building thermal physics [Text] / V.N. Bogoslovsky. — M. : Higher School Publ., 1982. — 415 p.
4. Samarin, O.D. Thermal physics. Energy saving. Energy efficiency [Text] / O.D. Samarin. — M. : ASV Publ., 2009. — 296 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.542.001

**Д.Э. АБРАМЕНКОВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ, С.В. ВАЖЕНИН,
Н.М. ДРОЗДОВ, А.И. ДЮКАРЕВ, Р.В. ЧИЧКАНОВ**

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДРОССЕЛЬНО-КЛАПАННОГО ПНЕВМОУДАРНОГО МЕХАНИЗМА

Рассматривается пневмоударный механизм с управлением впуском воздуха в камеру холостого хода посредством стержня, взаимодействующего со ступенчатым ударником.

Ключевые слова: пневматический механизм, ударник, давление воздуха, распределительный стержень, корпус, выпуск, выпуск, инструмент, камера рабочего хода, камера холостого хода.

Введение. Технические задачи, направленные на снижение энергоресурсов, потребляемых технологическими машинами, являются актуальными и требуют научно обоснованных предложений. Рассматриваемое предложение касается снижения удельного расхода воздуха пневматической машиной ударного действия, в основу которой положен пневмоударный механизм с управляемой камерой холостого хода.

Известны пневмоударные механизмы [1], имеющие цилиндры с выпускными и выпускными каналами, рабочие инструменты с хвостовиками, ступенчатые ударники с центральными сквозными каналами, жестко закрепленными относительно крышки стержнями. Стержень находится постоянно в центральном сквозном канале ударника и взаимодействует с каналом-пазом втулки. Ударник разделяет полость цилиндра на камеру сетевого и атмосферного давления со стороны штоковой части ударника и камеру холостого хода со стороны хвостовика рабочего инструмента. Канал-паз во втулке при взаимодействии со стержнем обеспечивает открытие и закрытие осевого отверстия ударника. На участке взаимодействия со штоковой частью ударника в цилиндре установлена втулка, образующая кольцевую ступень, ограничивающую ход ударника со стороны кольцевой камеры атмосферного давления.

Недостатками такого решения являются:

— кольцевая камера атмосферного давления, образованная цилиндром-корпусом и штоковой частью ударника, не участвует в создании силового импульса давления воздуха с ее стороны, что препятствует повышению удара;

— штоковая часть ударника образует посадку с втулкой цилиндра со стороны распределительной камеры, что при нарушении соосности между ними приводит к смешению стержня и возрастанию сил сопротивления движению поршневой части стержня во втулке ударника и их разрушению.

© Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Важенин С.В., Дроздов Н.М., Дюкарев А.И., Чичканов Р.В., 2011

1. Постановка задачи и техническое предложение по ее решению.

Исключить указанные недостатки можно заменой контактной посадки втулка — штоковая часть ударника на кольцевой дроссельный канал с расчетным проходным сечением, постоянно соединяющим кольцевую камеру со стороны штоковой части ударника с распределительной камерой. При этом втулка с пазами исключается, а канал впуска в камеру холостого хода находится непосредственно на боковой части поршня-стержня. Устойчивое радиальное положение ударника в цилиндре-корпусе обеспечивается контактной посадкой поршневой части ударника со стороны хвостовика инструмента.

Предложение авторов иллюстрируется принципиальной схемой (см. рисунок) пневматического устройства, которая содержит следующие элементы: 1 — цилиндр; 2 — ударник; 3 — штоковая часть ударника; 4 — поршневая часть ударника; 5 — осевой канал; 6 — стержень; 7 — поршневая часть стержня; 8 — паз; 9 — кольцевой фланец; 10 — распределитель-

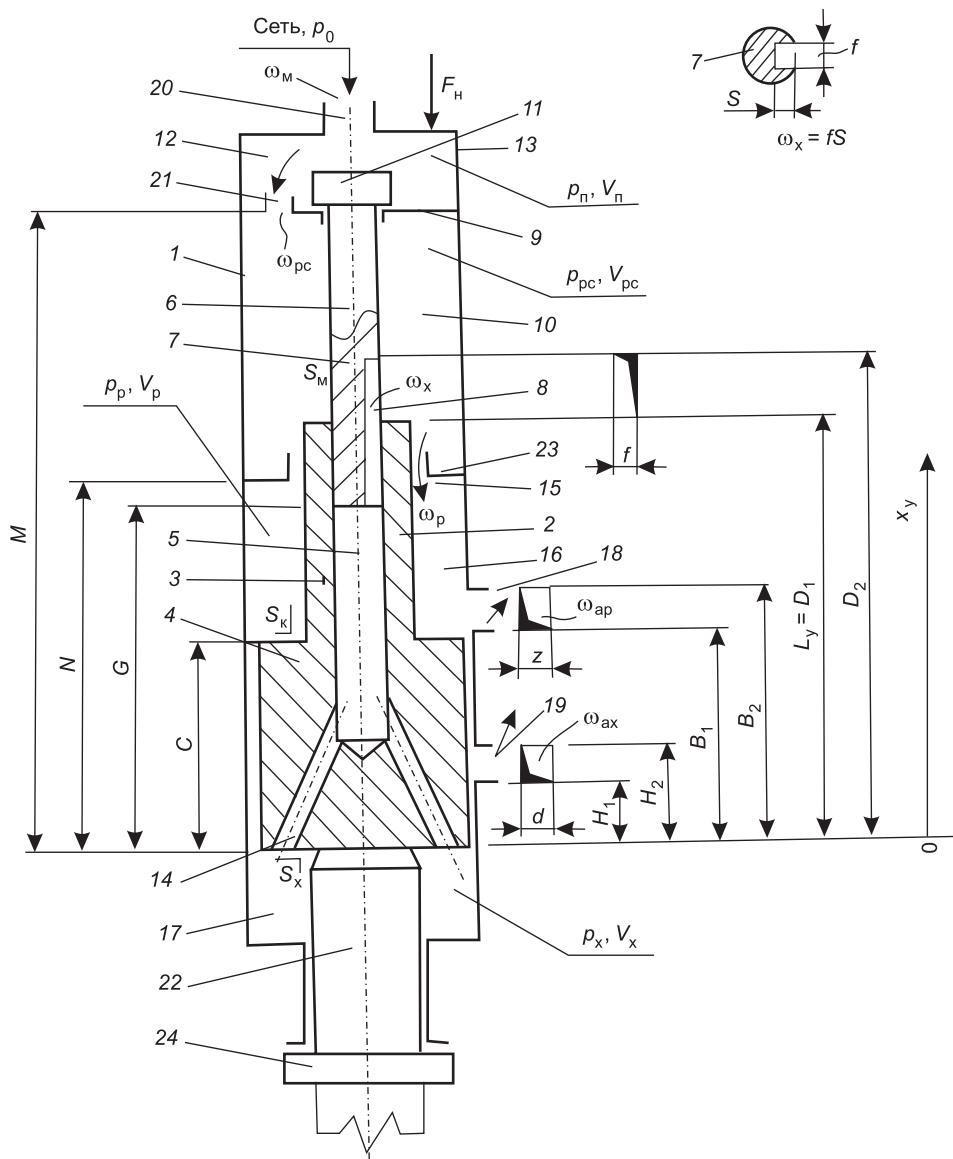


Схема пневматического устройства

тельная камера; 11 — буртик стержня; 12 — предкамера сетевого воздуха; 13 — крышка цилиндра; 14 — радиальные наклонные каналы; 15 — кольцевой дроссельный канал; 16 — кольцевая камера рабочего хода; 17 — камера холостого хода; 18 — канал выпуска отработавшего воздуха из камеры рабочего хода; 19 — канал выпуска отработавшего воздуха из камеры холостого хода; 20 — канал впуска сетевого воздуха; 21 — канал впуска воздуха в распределительную камеру; 22 — хвостовик рабочего инструмента; 23 — межкамерное разделительное кольцо; 24 — буртик инструмента.

Здесь ω_{ap} , ω_{ax} — проходные сечения каналов выпуска отработавшего воздуха из камер рабочего и холостого хода; ω_m , ω_{pc} , ω_x , ω_p — проходные сечения каналов впуска воздуха в предкамеру, распределительную камеру, камеры холостого и рабочего хода; S_m , S_k , S_x — площади сечения штоковой части ударника, кольцевой части корпуса и полная площадь сечения ударника; p_o , p_n , p_{pc} , p_p , p_x — давление воздуха в сети, в предкамере сетевого воздуха, распределительной камере, камерах рабочего и холостого хода; V_p , V_x , V_n , V_{pc} — объемы камер рабочего и холостого хода, предкамеры и распределительной камеры; F_h — усилие нажатия на корпус пневмоударного механизма; m_y , x_y , L_y — масса, перемещение и полная длина ступенчатого ударника; C — длина поршневой части ударника; z , d — ширина каналов выпуска; f , s — ширина и глубина канала впуска в камеру холостого хода; H_1 , H_2 , B_1 , B_2 — координаты отсекающих кромок каналов выпуска отработавшего воздуха соответственно из камеры холостого и рабочего хода; D_1 , D_2 — координаты канала впуска в камеру холостого хода; M , N , Q — координаты ограничения протяженности хода ударника до фланца, разделительного кольца, поршневой части стержня в осевом канале ударника.

Пневматический ударный механизм работает следующим образом. После включения пускового устройства (на чертеже не показано и может быть любым) воздух из сети поступает по каналу 19 в стакане 13 в распределительную камеру 10 сетевого воздуха. Далее через каналы 21 в кольцевом фланце 9 воздух поступает в распределительную камеру 10, откуда по каналу-пазу 8 штоковой части ударника воздух поступает по осевому каналу 5 и радиальным каналам 14 ударника в камеру холостого хода 17. Одновременно по кольцевому дроссельному каналу 15 воздух из распределительной камеры 10 поступает в камеру 16 рабочего хода, соединенную с атмосферой через выпускной канал 18. В начале движения ударника продолжается наполнение воздухом камеры холостого хода, чем обеспечивается расчетная величина импульса холостого хода. Под действием импульса давления со стороны камеры холостого хода ударник продолжает движение в сторону распределительной камеры 10, совершая холостой ход. При последующем движении ударник перекрывает выпускной канал 18 на цилиндре, а канал-паз 12 втулки 11 штоковой части ударника перекрывается поршневой частью 7 стержня 6, после чего давление воздуха в камере холостого хода выравнивается до атмосферного. В камере 16 после разобщения ее с атмосферой начнется сжатие отсеченного и поступающего через кольцевой дроссельный канал 15 воздуха до некоторой расчетной величины. Давление воздуха в распределительной камере увеличивается и под влиянием разности импульсов давлений воздуха, действующих на ударник со стороны распределительной камеры 10, кольцевой камеры 16 рабочего хода и камеры 17 холостого хода, ударник затормаживается и останавливается в расчетной точке. Сразу же под

действием импульса давления воздуха со стороны распределительной камеры, кольцевой камеры 16 рабочего хода ударник начинает двигаться в сторону хвостовика 23 рабочего инструмента 22, совершая рабочий ход. При этом ударник откроет выпускной канал 18 и кольцевая камера 16 будет сообщаться с атмосферой. Далее ударник перекроет своей боковой поверхностью выпускной канал 19, откроет канал-паз 12 втулки 11 в штоковой части ударника, вследствие чего в камере холостого хода начнется сжатие отсеченного в ней воздуха и воздуха, поступающего из распределительной камеры 10.

Так как рабочая площадь поршневой части ударника со стороны камеры холостого хода больше площади штоковой части ударника, то под действием разности импульсов давлений воздуха ударник, преодолевая противодавление со стороны камеры холостого хода, наносит удар по хвостовику инструмента. Под действием импульсов отскока и давления воздуха со стороны камеры холостого хода ударник начинает холостой ход. Далее рабочий цикл пневматического ударного механизма повторяется.

2. Аналитическое описание и ограничения для процесса пневмоударного механизма. Физико-математическая модель рабочего процесса описанного выше механизма представлена следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dp_n}{dt} = \frac{k}{V_n} [W(\omega_n \varphi_n - \omega_{pc} \varphi_c)], \\ \frac{dp_{pc}}{dt} = \frac{k}{V_{pc} - x_y S_y} \left[W(\omega_{pc} \varphi_{pc} - \omega_p \varphi_p - \omega_x(x_y) \varphi_x) + p_{pc} \frac{dx_y}{dt} S_m \right], \\ \frac{dp_p}{dt} = \frac{k}{V_p - x_y S_y} \left[W(\omega_p \varphi_p - \omega_{ap} \varphi_{ap}) + p_p \frac{dx_y}{dt} S_k \right], \\ \frac{dp_x}{dt} = \frac{k}{V_x - x_y (S_k + S_m)} \left[W(\omega_x(x_y) \varphi_x - \omega_{ax} \varphi_{ap}) - p_x \frac{dx_y}{dt} (S_k + S_m) \right], \\ \frac{d^2 x_y}{dt^2} = \frac{p_x (S_k + S_m) - p_{pc} S_m - p_p S_k}{m_y} \quad \text{при } x_y > 0, \\ \left(\frac{dx_y}{dt} \right)_o = -k_y \left(\frac{dx_y}{dt} \right)_y \quad \text{при } x_y \leq 0, \\ \frac{d^2 x_k}{dt^2} = \frac{(p_x (S_k + S_m) - p_{pc} S_m - p_c S_k) - F_h}{m_k} \quad \text{при } x_k > 0, \\ \left(\frac{dx_k}{dt} \right)_o = -k_k \left(\frac{dx_k}{dt} \right)_y \quad \text{при } x_k \leq 0. \end{cases} \quad (1)$$

В (1) кроме указанных ранее обозначены:

$W = [2kR/(k-1)]^{1/2}$, k , R — показатель процесса и газовая постоянная;

k_y , k_k — коэффициенты отскока ударника от хвостовика инструмента и цилиндра от буртика инструмента;

ω_m , ω_n , ω_p , ω_x — проходные сечения каналов впуска воздуха в предкамеру из сети, распределительную камеру из предкамеры, камеры рабочего и холостого хода.

Конструктивные ограничения и допущения (см. рисунок): $x_y \leq (N - C) \leq (M - D_1)$; стержень перемещается в радиальном направлении в размерах зазора; перетечки между фланцем и стержнем, поршневой частью стержня и осевым каналом в ударнике, поршневой частью ударника и цилиндром, хвостовиком инструмента и цилиндром незначительны и при предварительных исследованиях обычно не учитываются. Это же допущение учитывается при равенстве коэффициентов расходов воздуха ($\mu_i = 1,0$).

Бародинамические функции впуска воздуха в камеру из сети ($\varphi_m, \varphi_n, \varphi_p, \varphi_x$) по аналогии с зависимостью Сен-Венана — Вантцеля имеют вид

$$\varphi_i = \chi_i^{\frac{k+1}{2k}} \begin{cases} \left[(\chi_i \chi_0^{-1})^{\frac{2}{k}} - (\chi_i \chi_0^{-1})^{\frac{k+1}{k}} \right]^{\frac{1}{2}} & \text{при } \chi_i \chi_0^{-1} > 0,5288, \\ 0,259 & \text{при } \chi_i \chi_0^{-1} \leq 0,5288, \end{cases}$$

где $\chi_i = p_i / p_0, \chi_0 = p_0 / p_0 = 1$. При обратном истечении, когда $\chi_i > \chi_0$, следует $\varphi_i(\chi_i, 1) = \varphi_i(1, \chi_i)$.

Функции ($\varphi_{ap}, \varphi_{ax}$) выпуска отработавшего воздуха из камеры аналогичны записи φ_i :

$$\varphi_{ai} = \chi_{ai}^{\frac{k+1}{2k}} \begin{cases} \left[(\chi_{ai} \chi_0^{-1})^{\frac{2}{k}} - (\chi_{ai} \chi_0^{-1})^{\frac{k+1}{k}} \right]^{\frac{1}{2}} & \text{при } \chi_{ai} \chi_0^{-1} > 0,5288, \\ 0,259 & \text{при } \chi_{ai} \chi_0^{-1} \leq 0,5288, \end{cases}$$

где $\chi_{ai} = p_i / p_a, \chi_a = p_a / p_a = 1$. При $\chi_{ai} > \chi_a$ следует $\varphi_{ai}(\chi_{ai}, 1) = \varphi_{ai}(1, \chi_{ai})$. Координаты выпуска отработавшего воздуха из камер рабочего и холостого хода:

$$\omega_{ap} = \begin{cases} 0 & \text{при } (x_y + C) \geq B_2, \\ (B_2 - (x_y + C))Z & \text{при } B_1 < (x_y + C) < B_2, \\ (B_2 - B_1)Z & \text{при } (x_y + C) < B_1; \end{cases}$$

$$\omega_{ax} = \begin{cases} 0 & \text{при } x_y \leq H_1, \\ (x_y - H_1)d & \text{при } H_1 < x_y < H_2, \\ (H_2 - H_1)d & \text{при } x_y > H_2. \end{cases}$$

Площади каналов впуска воздуха в камеру холостого хода из распределительной камеры:

$$\omega_x = \begin{cases} 0 & \text{при } (x_y + L_y) \geq D_2, \\ fS & \text{при } D_2 > (x_y + L_y) > D_1, \\ fS & \text{при } (x_y + L_y) \leq D_1. \end{cases}$$

3. Ожидаемые результаты по использованию предложенного технического решения. Обработка многочисленных реальных диаграмм давлений воздуха в камерах рабочего и холостого хода показывает, что четкое управление расходом воздуха ударником позволяет сократить его для камер рабочего и холостого хода соответственно на 10...15 и 65...75 %. В целом расход воздуха пневмоударным механизмом можно

снизить до 30...40 %, что составит снижение по удельному расходу воздуха до $(1,6\ldots1,8) \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{Вт})$ при условии расчета проходных сечений каналов выпуска аналогично расчету их в дроссельном пневмоударном механизме. Как следует из предложения авторов, управление впуском воздуха только в камеру холостого хода позволит обеспечить удельный расход воздуха пневмоударным механизмом рассматриваемой принципиальной схемы до $(2,2\ldots2,5) \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{Вт})$.

Выводы. 1. Применение метода расчета площади проходных сечений каналов впуска воздуха в камеру холостого хода позволяет определить их оптимальные значения, достаточные для создания силового импульса давления воздуха со стороны камеры холостого хода, без их завышения.

2. Наличие кольцевой управляемой камеры со стороны рабочего хода создает дополнительные условия гарантированного безударного торможения ударника в конце его холостого хода и увеличения суммарного силового импульса давления воздуха со стороны распределительной камеры и кольцевой управляемой камеры рабочего хода.

3. Кольцевой дроссельный канал впуска воздуха в кольцевую камеру рабочего хода, являясь по расчету оптимальным по пропускной способности при незначительном по времени сообщении с атмосферой, не создает сколько-нибудь существенного увеличения расхода воздуха.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А б р а м е н к о в Э.А. Пневматические механизмы машин ударного действия: дроссельные, струйные, беззолотниковые, бесклапанные: справ. пособие [Текст] / Э.А. Абраменков, Д.Э. Абраменков. — Новосибирск: Изд-во НГУ, 1993. — 430 с.

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

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

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

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

ВАЖЕНИН С.В., асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

ДРОЗДОВ Н.М., асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

ДЮКАРЕВ А.И., канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

ЧИЧКАНОВ Р.В., асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

Получено после доработки 2.11.10

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

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

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

Drozdov N.M., post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Dukarev A.I., candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Chichkanov R.V., post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

PHYSICAL-MATHEMATICAL MODEL OF THROTTLE-VALVE PNEUMATIC PERCUSSIVE MECHANISM

We consider a pneumatic hammer mechanism with controlled intake of air into the idle speed on a means of interacting with a stepped rod drummer.

K e y w o r d s: pneumatic mechanism, drummer, air pressure, distributing the rod, block, intake, output, tool, camera working stroke, camera will idle.

REFERENCES

1. Abramenkov E.A. Pneumatic mechanisms of machines of shock action: throttle, jet, unspool, valveless: Reference manual [Text] / E.A. Abramenkov, D.E. Abramenkov. — Novosibirsk: Publ. House NSU, 1993. — 430 p.
-

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 624.131:624.137

Н.И. ГОРШКОВ, М.А. КРАСНОВ

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ И НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СИСТЕМЫ «ШТАМП — ОСНОВАНИЕ» НА ОСНОВЕ РАСЧЕТОВ МКЭ

Целью работы является сравнительная оценка устойчивости системы «штамп — основание» на основе расчетов МКЭ и формул инженерных методов, разработка новых способов фиксации потери устойчивости и оценки несущей способности основания этой системы.

Ключевые слова: грунт, основание, устойчивость, линия скольжения, несущая способность.

В инженерных методах оценки устойчивости грунтовых массивов и оснований используются следующие допущения (плоская задача):

- оползающий или сдвигаемый грунтовый массив (призма оползания) отделяется от неподвижного массива поверхностью скольжения;
- во всех точках поверхности скольжения соблюдаются условия предельного состояния, основанные на том или ином условии прочности;
- для условий равновесия на поверхности скольжения используются уравнения статики.

Для практических расчетов призма оползания разбивается на вертикальные отсеки. Линия скольжения задается в виде прямой, круглоцилиндрической или произвольной формы.

Основное отличие инженерных методов друг от друга заключается в принятых упрощениях — в учете сил, действующих на отсек, числе решаемых уравнений равновесия и возможности расчета по некруглоцилиндрической линии скольжения.

В качестве величины, по которой производится оценка устойчивости, введено понятие расчетного значения коэффициента запаса устойчивости k_{st} как меры использования возможного предельного сопротивления грунтов на искомой линии скольжения.

Стандартное условие оценки устойчивости для линии скольжения записывается в виде следующего неравенства:

$$k_{st} \geq [k_{st}], \quad (1)$$

где $[k_{st}]$ — нормативное, или требуемое, значение коэффициента запаса устойчивости.

Если линия скольжения не является фиксированной, то наиболее опасная линия находится в серии расчетов по минимальному значению коэффициента $k_{st\ min}$. Кроме этого, в оценке устойчивости используются решения теории предельного равновесия, развитые проф. В.В. Соколов-

ским (1960) и его последователями. В допущениях этой теории принимается, что весь массив грунта находится в предельном состоянии и везде имеется система линий скольжения. Местоположение наиболее опасной линии определяется при решении самой задачи, а ее форма уже определена на стадии постановки задачи. В общем случае оценка устойчивости производится по некоторым условиям для конкретной линии скольжения, а значения k_{st} зависят от ее формы и длины, «тяжести» принятых допущений. Приложение метода конечных элементов (МКЭ) к решению задач геомеханики сразу предполагало использование его результатов в оценке устойчивости грунтовых сооружений и природных склонов. Результаты расчета в виде вычисленных в узлах или конечных элементах (КЭ) компонент тензора напряжений σ_{ij} давали возможность использовать эти величины в оценке устойчивости.

В первых исследованиях устойчивости грунтовых массивов на основе МКЭ k_{st} вычислялся как частное от деления предельных касательных напряжений τ_u на расчетные τ [1 и др.]. Его численное значение определялось суммированием значений напряжений по всем КЭ, расположенным на искомой линии скольжения любой формы ($k_{st} = \Sigma \tau_u / \Sigma \tau$). Этот способ вычисления можно назвать методом «предельных касательных напряжений».

Результат оценки устойчивости, полученный на основе расчетов МКЭ, зависит от класса решаемой задачи (упругости, пластичности и т.п.) и особенностей численного решения (типа КЭ, сетки разбики, граничных условий и др.).

Проблему правильности оценки из-за отсутствия точного решения решали сравнением с результатами оценки, выполненными на основе инженерных методов.

При моделировании системы «сооружение — геосреда» в рамках решения задачи теории пластичности МКЭ можно увидеть возникновение и развитие зон предельного состояния или «пластичности» и на этой основе для того или иного инженерного варианта вычисления k_{st} выполнить оценку основного допущения — во всех ли точках поверхности скольжения соблюдаются условия предельного состояния?

Представляет интерес и сравнительная оценка результатов вычисления k_{st} по формулам инженерных методов и формуле $k_{st} = \Sigma \tau_u / \Sigma \tau$.

При использовании авторских методов оценки устойчивости на основе расчетов МКЭ можно создать алгоритмы по учету фильтрации, сейсмики и других факторов, не требующих решения связных и динамических задач. В большинстве авторских формул значения удерживающих и сдвигающих сил в вертикальных отсеках оползневого тела вычисляются как функция собственного веса материала отсеков. Собственный вес вертикальных отсеков Q_i с достаточной для практики точностью можно вычислить на основе расчетов МКЭ [2] по следующей формуле:

$$Q_i = |\sigma_{yyi}| b_i, \quad (2)$$

где σ_{yyi} — значение вертикальной нормальной компоненты тензора напряжений в выбранном узле или КЭ на дуге линии скольжения i -го отсека; b_i — ширина i -го отсека.

Если в выбранном на линии скольжения КЭ $\sigma_{yyi} > 0$ (растяжение), то коэффициент запаса устойчивости в таком вертикальном отсеке не вычисляется.

В строительном проектировании при оценке устойчивости грунтовых сооружений и сравнительном анализе желательно использовать не-

сколько методов расчета. В программном средстве GenIDE32 используется несколько вариантов оценки устойчивости: по К. Терцаги, Г. Крею, А. Бишопу, Н.Н. Маслову (горизонтальных сил — по Маслову–Береру), Г.М. Шахунянцу «предельных касательных напряжений»¹.

Для сравнительной оценки результатов расчета устойчивости использовался эталонный пример в виде природного однородного склона, параметры которого приведены в работе Маслова².

Исходные данные по расчетной схеме склона: размеры основания склона 175×40 м, высота 20,0 м, ширина по верху 44,5 м, заложение 1: $m \approx 1 : 2,4$; грунт — суглинок тугопластичный $\gamma = 20,7$ кН/м³, $E = 45$ МПа, $v = 0,35$, $c = 20$ кПа, $\phi = 12^\circ$.

В табл. 1 приведены результаты вычисления k_{st} , выполненные вручную и на основе расчетов МКЭ по программе GenIDE32, для отдельной дуги круглоцилиндрической поверхности скольжения (КЦПС).

Таблица 1
Результаты расчета коэффициента запаса устойчивости склона

Вариант расчета	К. Терцаги	Н.Н. Маслов	Г.М. Шахунянц	Г. Крей	А. Бишоп	$\Sigma \tau_u / \Sigma \tau$
1	0,99	0,88	1,00	1,03	1,04	—
2	1,00	0,90	0,96	1,05	1,05	1,05
3	1,01	0,91	0,98	1,07	1,07	1,07

Примечание. 1 — значения k_{st} на дуге КЦПС (инженерные методы — табличный расчет), 2 — то же (упругое решение — МКЭ), 3 — то же (упругопластичное решение — МКЭ).

В численном решении задачи теории пластического течения на основе ассоциированного закона и условия текучести Кулона–Мора использовался один из вариантов метода начальных напряжений. Решение линейных уравнений производилось методом квадратного корня. Частота выбора КЭ по дуге окружности задавалась в градусах с интервалом изменения $0,5^\circ$.

В табл. 2 приведены результаты поиска КЦПС с $k_{st \min}$. По каждому варианту оценки выполнялся поиск поверхности с $k_{st \ min}$ при десятикратной повторяемости расчетов. Поле однократного поиска — 576 центров ПС с шагом по осям 0,10 м.

Сравнительный анализ результатов расчетов показывает справедливость вывода: инженерные методы, использующие концепцию поиска «фиксированной поверхности обрушения» с минимальным коэффициентом запаса, следует признать обоснованными³.

Результаты расчетов, выполненные в упругопластической постановке при условии мгновенного создания однородного склона и основания, отличаются от такого же упругого решения в сторону повышения величины $k_{st \ min}$ незначительно (0,01...0,02).

¹ Горшков Н.И., Краснов М.А. Программа GenIDE32 для решения прикладных задач геомеханики / Система сертификации ГОСТ Р Госстандарт России. Сертификат соответствия № РОСС RU.CP15.H00262, 21.09.2009.

² Маслов Н.Н. Механика грунтов в практике строительства (оползни и борьба с ними): Учеб. пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1977.

³ Зарецкий Ю.К., Ломбардо В.Н., Грошев М.Е., Олимпиев Д.Н. Устойчивость грунтовых откосов // ОФМГ. 1980. № 1. С. 23–27.

Таблица 2

Результаты расчета минимального коэффициента запаса устойчивости склона

Вариант расчета	К. Терцаги	Н.Н. Маслов	Г.М. Шахунянц	Г. Крей	А. Бишоп	$\Sigma \tau_u / \Sigma \tau$
1	1,01... 1,03	0,89... 0,90	0,94... 0,95	1,07... 1,09	1,05... 1,09	1,04... 1,11
2	1,02	0,90	0,95	1,08	1,07	1,07
3	1,04... 1,05	0,90... 0,91	0,98... 1,00	1,06... 1,10	1,06... 1,10	1,06... 1,14
4	1,05	0,91	0,98	1,09	1,08	1,09

При мечание. 1 и 2 — крайние пределы значений $k_{st \min}$ и среднеарифметическое $k_{st \min}$ в десяти расчетах (упругое решение — МКЭ); 3 и 4 — то же (упругопластичное решение — МКЭ).

При десятикратном поиске разница между максимальным и минимальным значениями k_{st} не превышала 0,04 для всех вариантов вычисления, кроме последнего варианта ($k_{st} = \Sigma \tau_u / \Sigma \tau$), где она достигала величины 0,08.

Анализ уровней значений компонент тензора напряжений σ_{ij} в месте прохождения линии скольжения с $k_{st \ min}$, выполненный по результатам упругого и упругопластического решений, показывает, что наблюдаются некоторые отличия в горизонтальных σ_{xx} и максимальных τ_{\max} касательных напряжениях. Для вертикальных напряжений σ_{yy} отличий нет.

При наложении линий скольжения с $k_{st \ min}$ на расчетную схему в упругопластическом решении наблюдается более густое скопление линий скольжения, чем в упругом решении. На расчетной схеме место наложения представлено в виде криволинейной ленты шириной от 2 до 8 м (рис. 1). Все линии скольжения (длина $L = 50...55$ м) начинались в 5...11 м от бровки склона и выходили у подножия, и все, кроме небольшого участка в верхней части склона ($l \approx 5,0$ м), проходили по зонам «пластичности».

Учет последовательности в технологии устройства линейных инженерных сооружений (выемок, насыпей и др.) в упругопластическом решении повышает расчетный коэффициент запаса устойчивости k_{st} на сотые доли единицы.

Результаты практических расчетов, выполненных на реальных объектах строительства (неоднородные насыпи и выемки, склоны, насыпи на слабых грунтах, сооружения на неоднородных склонах и откосах) в упругой и упругопластической постановке, в каждом варианте оценки устойчивости отличаются друг от друга на сотые, а иногда и на десятые доли

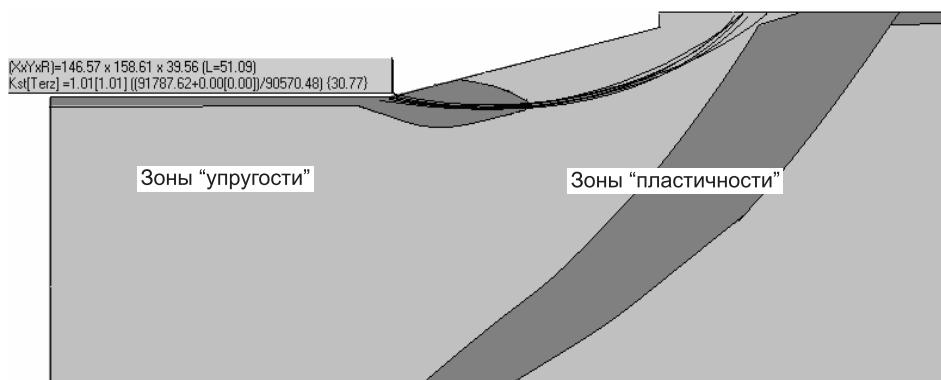


Рис. 1. Зоны «пластичности» и линии скольжения с $k_{st \ min}$ при десятикратной повторяемости расчетов по оценке устойчивости природного склона (фрагмент расчетной схемы)

единицы. В целом линии КЦПС с $k_{st \min} \approx 1,00$ всегда проходят по зонам «пластичности», а места выхода на поверхность совпадают с местами концентрации значений компонент вектора смещений u_i или тензора относительных деформаций ϵ_{ij} .

Действие сейсмических и фильтрационных сил, армирование инженерных сооружений и другие факторы учитываются в расчетах устойчивости с помощью специально разработанных алгоритмов и простых, удобных средств интерфейса GenIDE32. Оценка устойчивости по линиям скольжения, форма которых определяется на основе анализа НДС системы «сооружение–геосреда» или ее строением, также не требует много времени.

Кроме этого, для сравнительной оценки методов расчета устойчивости можно использовать результаты «точного» решения задач теории пластичности, например задачу о действии гибкого штампа на однородную невесомую полуплоскость (задача Л. Прандтля). К этой задаче часто прибегают исследователи для сравнительной оценки несущей способности основания по МКЭ. Результаты одной из первых работ в этом направлении были опубликованы в статье [3], где использовалась расчетная область (высота 3,6 м, ширина 7,2 м), моделирующая однородное, изотропное и невесомое основание с учетом симметрии относительно его центральной оси. Половина ширины гибкого штампа равна 1,44 м. Глинистый грунт основания, деформирующийся в соответствии с законом ассоциированного пластического течения и условием прочности Кулона–Мора, имел параметры: $E = 21,0$ МПа, $\nu = 0,3$, $c = 0,07$ МПа, $\phi = 20^\circ$.

Значения предельных давлений p_u , вычисленных для этой расчетной схемы по решениям Л. Прандтля и К. Терцаги, равны 1,00 и 1,22 МПа соответственно; на основе решения задачи теории пластического течения МКЭ 1,06 МПа [3]. После достижения давления $p_u = 1,06$ МПа фиксировалось расхождение решения, а на графике зависимости вертикального смещения основания от нагрузки наблюдался резкий «провал». Здесь необходимо отметить, что результаты численного решения зависят от того, как в нем учитывается выход материала в предельное состояние в зонах растяжения. В статье [3], как и во многих других, показано возникновение и развитие зон предельного состояния или «пластичности» при траекториях нагружения, не выделяющих зоны растяжения.

Авторы настоящей статьи использовали модифицированные алгоритмы, приведенные в монографии проф. А.Б. Фадеева⁴, где учитывается выход материала в предельное состояние в зонах растяжения, после которого автоматически производится коррекция напряженного состояния. При разработке программы авторы для сравнения выполнили решение задач известных исследователей, развивающих приложения МКЭ к задачам геомеханики, например проф. А.К. Бугрова⁵. В ряде его задач моделировались результаты опытов со штампами. Для сравнительного анализа контактных напряжений при взаимодействии штампа с глинистыми грунтами были промоделированы опыты проф. А.П. Криворотова⁶. Результаты решений в сравнении с результатами опытов имели одинаковый порядок величин.

⁴ Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. М.: Недра, 1987.

⁵ Бугров А.К., Зархи А.А. Некоторые результаты решения смешанных задач теории упругости и пластичности грунтов оснований // ОФМГ. 1978. № 3. С. 35–39.

⁶ Криворотов А.П., Халтурин Л.В. Напряженное состояние глинистого грунта в контактном слое под подошвой жесткого полосового штампа // ОФМГ. 1991. № 2. С. 20–23.

Целью второй части исследования являлась сравнительная оценка результатов расчета устойчивости на основе МКЭ с использованием формул инженерных методов. В качестве расчетной схемы системы «гибкий штамп — основание» использовалась схема из статьи [3] без учета симметрии с размерами $28,8 \times 14,4$ м и шириной $b = 2,88$ м штампа (размер треугольных КЭ $0,144 \times 0,144$ м). Принятые размеры расчетной области исключают касание зонами «пластичности» границ расчетной области при нагружении основания предельным давлением и практически не влияют на результаты решения.

Решение задачи включает:

- расчет начального напряженного состояния основания, если оно весомое;
- приложение ступенями распределенной нагрузки через гибкий или жесткий штамп на поверхность основания.

После каждого этапа приложения нагрузки (за пределами линейной части графика $p(u_y)$) автоматически выполнялась оценка устойчивости модели системы «штамп — основание» по стандартному условию как для КЦПС (поиск линии с $k_{st \min}$), так и для фиксированных линий скольжения произвольных форм, если это необходимо. После пробных расчетов на расчетной схеме выделены мониторинговые узлы и КЭ, расположенные в окрестности линии скольжения с $k_{st \ min}$. По результатам каждой серии расчетов выполнялся графический анализ изменения величин в таких узлах и КЭ.

Результаты оценки устойчивости для невесомого основания при действии на него гибкого штампа представлены в табл. 3, где указаны значения предельных давлений (МПа), если достигнуто условие $k_{st} \approx 1,00$ ($\pm 0,02$) или значения давлений последней стадии нагружения с k_{st} , который при последующих этапах нагружения не меняется. Там же, для сравнения, представлены результаты серии расчетов для весомого основания при действии на него гибкого и жесткого (невесомого с прилипанием) штампов (отношение модулей деформации материала штампа и грунта основания равно $E_{шт} / E_{гр} = 10^6$).

Таблица 3
Результаты оценки устойчивости для невесомого основания при действии на него гибкого штампа

Вариант расчета	К. Терцаги	Н.Н. Маслов	Г.М. Шахунянц	Г. Крей	А. Бишоп	$\Sigma \tau_u / \Sigma \tau$
1 (p / k_{st})	0,94 / 1,00	0,44 / 1,00	0,80 / 0,99	1,08 / 1,00	1,08 / 1,00	1,54 / 1,18
2 (p / k_{st})	1,12 / 0,99	0,74 / 1,00	1,04 / 0,99	1,32 / 1,02	1,32 / 1,02	1,32 / 1,04
3 (p / k_{st})	1,40 / 1,00	0,92 / 0,99	1,32 / 0,99	1,74 / 1,02	1,74 / 1,02	1,74 / 1,09

Примечание. 1 — гибкий штамп (удельный вес грунта основания $\gamma_{гр} = 0,00$ МН/м³), 2 — гибкий штамп ($\gamma_{гр} = 0,02$ МН/м³), 3 — жесткий штамп ($\gamma_{гр} = 0,02$ МН/м³).

Исследователи, например проф. З.Г. Тер-Мартиросян⁷, характеризуя особенности методов оценки устойчивости на основе теории предельного состояния, придерживаются мнения: «...трудно предположить, что во всех точках рассматриваемого массива одновременно возникает состояние предельного равновесия».

В невесомом основании (гибкий штамп) конечный участок КЦПС, выходящий на поверхность, при достижении условия $k_{st} \approx 1,00$ находился

⁷ Тер-Мартиросян З.Г. Прогноз механических процессов в многофазных грунтах. М.: Недра, 1986.

вне зон «пластичности» для всех вариантов оценки, представленных в табл. 3: от половины длины дуги (вариант Н.Н. Маслова и Г.М. Шахунянца) до четверти (вариант Г. Крея). В весомом основании (гибкий и жесткий штампы) то же наблюдалось у первых трех вариантов оценки (рис. 2), а для последних трех (Г. Крей, А. Бишоп, «пределных касательных напряжений») КЦПС проходила внутри зон «пластичности» (рис. 3), т. е. для них численное решение подтверждает основное допущение инженерных методов.

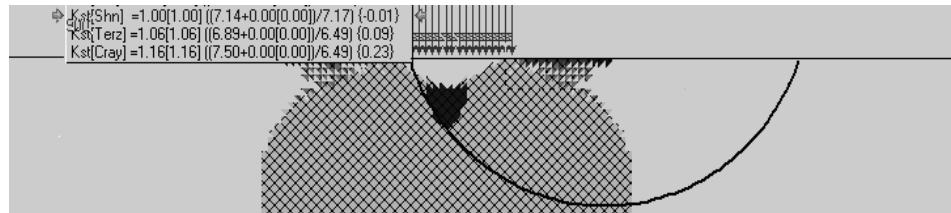


Рис. 2. Зоны «пластичности» в основании гибкого штампа при $k_{st \min} = 1,00$, $p_u = 1,02$ МПа (вариант Г.М. Шахунянца)



Рис. 3. Зоны «пластичности» в основании гибкого штампа при $k_{st \min} = 1,00$, $p_u = 1,36$ МПа (вариант Г. Крея)

Линии скольжения начинались в пределах ширины гибкого штампа на некотором расстоянии от его левого края (невесомое основание): от $0,2 b$ (вариант Г. Крея) до $0,33 b$ (вариант Н.Н. Маслова); для весомого основания от $0,2 b$ (вариант «пределных напряжений») до $0,33 b$ (вариант А. Бишопа). Для жесткого штампа линия также начиналась на некотором расстоянии от его левого края для всех вариантов оценки устойчивости.

При действии гибкого штампа на весомое основание резкий перегиб на графике зависимости $p(u_y)$ происходил при давлении $p = 1,26$ МПа, для жесткого наблюдается плавное изменение кривизны графика без видимых резких перегибов. При таком давлении возникли зоны «пластичности» у поверхности основания (место выхода линий скольжения с $k_{st \min}$) и произошло их смыкание с зонами «пластичности», образовавшимися ранее под гибким штампом; для жесткого штампа смыкание зон «пластичности» без резкого изгиба графика $p(u_y)$ наблюдалось при давлении $p = 1,58$ МПа.

Как видно из данных таблицы, условие устойчивости нарушается при больших давлениях, чем давления, при которых произошел выход зон «пластичности» на поверхность основания.

Была решена задача Л. Прандтля для невесомого основания, в которой на каждом шаге нагружения выполнялась оценка устойчивости системы. Оценка производилась по заранее заданной в узлах сетки разбивки некруглоцилиндрической линии скольжения (прямая, логарифмическая спираль и прямая) с использованием трех вариантов оценки (Н.Н. Маслова, Г.М. Шахунянца и $k_{st} = \Sigma \tau_u / \Sigma \tau$). Ширина зоны выпора на свободной поверхности для линии скольжения по «точному» решению Л. Прандтля равна $L_b = 7,28$ м.

Согласно расчету значения предельных давлений для двух первых вариантов оценки на момент потери устойчивости системы равны соответственно $p_u = 0,60$ МПа и $p_u = 0,84$ МПа. В последнем варианте оценки потеря устойчивости не достигала 2,00 МПа. Во всех трех вариантах оценки устойчивости только первая короткая прямая и логарифмическая спираль линии скольжения находились в зонах «пластичности». Для весомого основания в процессе его нагружения гибким штампом постепенно четко вырисовывается потенциальная поверхность скольжения. Ширина зоны выпора равна $L_b = 5,76$ м, угол наклона линии скольжения на выходе ее к поверхности основания равен $\alpha \approx 35^\circ$ ($45^\circ - \varphi/2$). Для весомого основания при нагружении его жестким штампом потенциальная линия скольжения слабо вырисовывается при выводе на экран уровней значений любых величин.

Подводя итог второй части исследования, можно указать на уже известные выводы, например, что вариант К. Терцаги дает заниженные значения k_{st} при пологих откосах ($m > 2,5$), а в вариантах Г. Крея и А. Бишопа в уравнениях статики учитывается больше сил, действующих на вертикальный отсек, по сравнению с другими вариантами.

Таким образом, для одного решения задачи «штамп — основание» при разных вариантах вычисления k_{st} можно получить несколько значений предельных давлений p_u .

При анализа напряженно-деформированного состояния системы выяснилось, что в узлах и КЭ, расположенных в окрестности выхода линии скольжения на поверхность основания, графики зависимости «величина — номер этапа нагружения» отличаются от аналогичных графиков других мест линии скольжения. В этом месте практически все вычисляемые величины резко меняются при достижении системой условия $k_{st} \approx \approx 1,00$. С приближением системы к предельному состоянию значение величины начинает мало изменяться и стремится к асимптоте, а затем резко уменьшается при $k_{st} \approx 1,00$ (рис. 4). Начало асимптотического изменения величины совпадает с образованием зон «пластичности» на поверхности основания. Резкое ее изменение указывает на завершение образования линии скольжения.

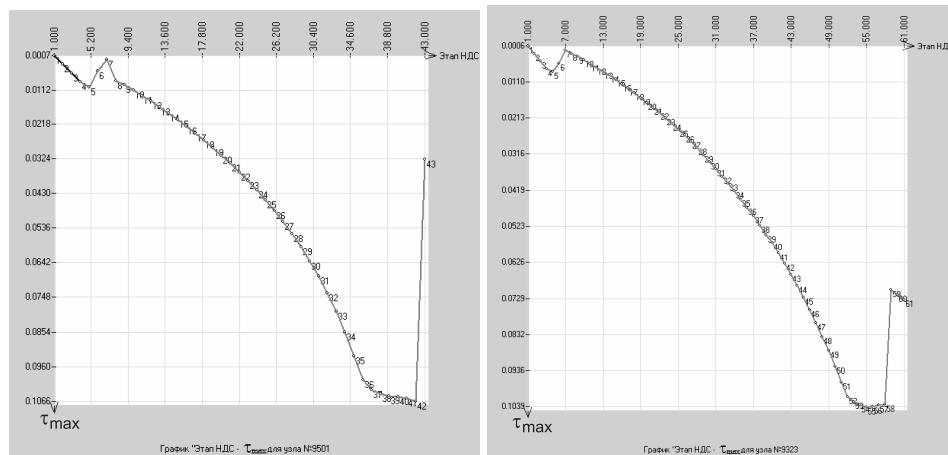


Рис. 4. Графики зависимости $\tau_{\max}(n)$ для места выхода ПС на поверхность основания при действии гибкого (слева) и жесткого (справа) штампов; τ_{\max} — максимальное касательное напряжение и n — этапы нагружения

В литературе можно найти объяснения полученным аналитическим результатам. При опытном моделировании образования и движения трещины в большом образце горной породы наблюдаются некоторые предвестниковые эффекты — скачки значений величин, определяющих ее окончательное развитие [4]. Это последнее место является «плотиной», сдерживающей выход накопившейся энергии разрушения.

Место выхода предполагаемой, но не моделируемой по законам механики трещины легко определяется в численном решении при анализе развития зон «пластичности» и уровней значений выводимых величин. Для этой задачи выход зон «пластичности» на поверхность основания, как уже указывалось, происходил при $p = 1,26$ МПа (гибкий штамп) и $p = 1,58$ МПа (жесткий штамп).

На графике (рис. 4) наблюдаются изменения величин в начальные этапы нагружения, что, очевидно, связано с приспособлением системы к монотонному нагружению. На начальных этапах нагружения наблюдаются изменения в траекториях нагрузления в пространстве шарового инварианта σ и девиатора σ_i тензора напряжений σ_{ij} .

Таким образом, по резким изменениям в значениях величин на последних этапах нагружения весомого основания штампом, фиксируемым в местах выхода линии скольжения на поверхность основания, можно определить потерю устойчивости системы и величину предельного давления p_u , характеризующего несущую способность основания. Этот же способ, очевидно, можно использовать и при оценке устойчивости таких грунтовых сооружений, как выемки, насыпи и т.п. В этом случае необходимо выполнять последовательное моделирование их устройства.

Выводы. 1. Результаты решений прикладных задач геомеханики на основе МКЭ можно использовать в оценке допущений и упрощений, принятых в инженерных методах оценки устойчивости грунтовых сооружений.

2. Для невесомого основания, нагруженного гибким штампом (задача Л. Прандтля), основное допущение теории предельного равновесия не выполняется для всех рассмотренных вариантов оценки устойчивости по КЦПС, а также по сложной линии скольжения (из прямой, логарифмической и прямой линий).

3. Для весомого основания, нагруженного гибким или жестким штампом, основное допущение теории предельного равновесия выполняется для вариантов оценки устойчивости Г. Крея, А. Бишопа и «предельных касательных напряжений» и не выполняется для вариантов К. Терцаги, Н.Н. Маслова и Г.М. Шахунянца.

4. Определение предельного давления p_u на основание по результатам оценки устойчивости с использованием разных формул вычисления k_{st} приводит к разным результатам.

5. При численном исследовании устойчивости системы «штамп — основание» по резким изменениям значений величин, происходящим в месте выхода линии скольжения на поверхность основания, можно зафиксировать потерю устойчивости системы, при этом отсутствует необходимость в определении или задании формы линии скольжения и вычислении на ней значения k_{st} .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Хуан, Я.Х. Устойчивость земляных откосов [Текст] / Я.Х. Хуан : пер. с англ. В.С. Забавина / Под ред. В.Г. Мельника. — М. : Стройиздат, 1988. — 240 с.
- Горшков, Н.И. Методика и опыт оценки устойчивости модели системы «автомобильная дорога — геосреда» на основе метода конечных элементов (МКЭ) [Текст] / Н.И. Горшков, М.А. Краснов // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопас-

- ность движения: Региональный ежегодный сб. науч. тр. — Хабаровск : Изд-во Хабаров. гос. техн. ун-та, 2001. — Вып. 1. — С. 10–21.
3. Zienkiewicz, O.C. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics [Text] / O.C. Zienkiewicz, C. Humpheeson, R.W. Lewis // Geotechnique. — 1975. — N. 4. — P. 671–689.
 4. Соболев, Г.А. Физика землетрясений и их предвестники [Текст] / Г.А. Соболев, А.В. Пономарев ; отв. ред. В.Н. Страхов. — М. : Наука, 2003. — 270 с.

*ГОРШКОВ Н.И., канд. техн. наук, доц.; E-mail: Fem_Soft@mail.ru
Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск*

*КРАСНОВ М.А., инж.; E-mail: Fem_Soft@mail.ru
Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск*

Получено после доработки 07.12.10

От редакции. Публикуя данную статью, обращаем внимание читателей на необходимость уточнения положения и размеров зоны пластичности, изображенной на рис. 1.

Gorshkov N.I., candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: Fem_Soft@mail.ru, Pacific State University, Khabarovsk, Russia
Krasnov M.A., engineer; E-mail: Fem_Soft@mail.ru, Pacific State University, Khabarovsk, Russia

COMPARATIVE EVALUATION OF STABILITY AND BEARING CAPACITY OF THE «PLATE-BASE» SYSTEM ON THE BASIS OF THE FINITE ELEMENT METHOD

The purpose of the work is the comparative evaluation of the stability of the «plate-base» system elements on the basis of the finite element method and formulas of engineering methods, development of novel criteria for the stability loss and the estimation of the bearing capacity of the system base.

Key words: ground, base, stability, line of sliding, bearing capacity.

REFERENCES

1. Huang, Ya.X. Stability analysis of earth slopes [Text] / Ya.X. Huang. — M. : Stroyizdat, 1988. — 240 p.
2. Gorshkov, N.I. Procedure and experience of application for the estimation of stability of the «Road-geomedium» model on the basis of the finite element method [Text] / N.I. Gorshkov, M.A. Krasnov // The far east. road and safety traffic : Regional annual scientific paper collection. — Khabarovsk : 2001. — Vol. 1. — P. 10–21.
3. Zienkiewicz, O.C. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics [Text] / O.C. Zienkiewicz, C. Humpheeson, R.W. Lewis // Geotechnique. — 1975. — N 4. — P. 671–689.
4. Sobolev, G.A. Physics of earthquakes and their forerunners [Text] / G.A. Sobolev, A.V. Ponomarev, V.N. Ctrahov. — M. : Science, 2003. — 270 p.

УДК 691:678.04.001

А.М. ДАНИЛОВ, И.А. ГАРЬКИНА

**МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ МАТЕРИАЛОВ
СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ***

Рассматривается разработка материалов специального назначения на основе системного подхода с использованием модифицированной методологии проектирования сложных систем.

Ключевые слова: сложные системы, методология проектирования, системный подход, приложение к разработке композитов.

К настоящему времени традиционные методы исследования и разработки новых материалов, порой с уникальными характеристиками, во многом себя исчерпали. Все больше требуется междисциплинарных исследований. Уже накоплен значительный опыт разработки сложных систем на основе системного подхода, заложенного еще в 1963 году в методике ПАТТЕРН (Planning Assistance Through Technical Relevance Number, англ. — помочь планированию посредством относительных показателей технической оценки). К сожалению, в области синтеза строительных материалов мало что изменилось. Ниже приводятся в целом положительные итоги использования модификаций указанного метода при разработке в Пензенском государственном университете архитектуры и строительства (научная школа А.П. Прошина) материалов специального назначения.

Во избежание возможных недоразумений, прежде всего, остановимся на имеющихся различиях между понятиями «большая система» и «сложная система» (многими авторами эти термины используются как синонимы).

Понятие «большая система» широко использовалось в период становления системных исследований (особенно после появления книги [1] для того, чтобы подчеркнуть принципиальные особенности объектов и проблем, требующих применения системного подхода). Рядом авторов это понятие связывается с величиной системы, количеством элементов (даже относительно однородных). А другими в качестве признаков большой системы рассматривается наличие:

- иерархической структуры (сужает класс структур, с помощью которых может отображаться система);
- больших потоков информации;
- большого числа алгоритмов ее переработки.

Одним из признаков рассматривается и эргатичность (взаимодействие технологических и человеческих факторов; трудноформализуемое).

Большая система характеризуется высокой размерностью, большим числом показателей и объемом информации для ее описания. Ее другая особенность заключается в невозможности значительного уменьшения

* Выполнена по заказу Министерства образования и науки РФ (гос. рег. № 01200850940).

числа показателей без утраты качественной определенности системы (без изменения ее свойств). Если и при выделении «главных» показателей требуется большой объем информации и вычислений для описания системы, то система также является большой. Иногда под большой системой понимают ту, которую невозможно исследовать иначе, как по подсистемам.

Сложная система определяется как составной объект, части которого также можно рассматривать как системы, закономерно объединенные в единое целое в соответствии с определенными принципами или связанные между собой заданными отношениями. Ее можно (не обязательно единственным образом) расчленить на конечное число частей (подсистем). Каждую подсистему (высшего уровня) можно в свою очередь расчленить на конечное число более мелких подсистем и т.д., вплоть до получения подсистем первого уровня (элементов). Свойства каждого из элементов в общем случае зависят от условий, определяемых поведением других элементов. Свойства сложной системы определяются не только свойствами элементов, но и характером взаимодействия между ними. Сложность системы проявляется в нелинейности, значительном числе степеней свободы, наличии «памяти» и других свойств, приводящих к слабой предсказуемости поведения системы. Две системы с попарно одинаковыми элементами, но с различными взаимодействиями между ними должны рассматриваться как две разные системы.

Различие между большой и сложной системами определяется характером моделирования систем: большая система может быть описана на одном языке, с помощью единого метода моделирования, хотя и по частям, по подсистемам; модели же подсистем сложных систем разрабатываются и изучаются в рамках различных дисциплин (системный подход требует междисциплинарных исследований).

Что касается композиционных материалов, то их можно рассматривать как сложные системы [2], состоящие из неоднородных подсистем, модели которых разрабатываются и изучаются в рамках различных дисциплин. В частности, формирование основных физико-механических характеристик может изучаться на основе методов ретроспективной идентификации динамических систем [3]. Определение условий флокуляции в дисперсной системе возможно на основе ее представления как системы частиц, движущихся под действием сил гравитационного и парного взаимодействий, взаимодействия с границами и дисперсионной средой [4]. Эффективный подбор вида и количества модифицирующей добавки (например, для получения серного связующего с высокими показателями прочности и стойкости радиационно-защитного композита в различных агрессивных средах) возможно с изучением влияния модifikатора на свойства серы¹ и т.д.

Во многих случаях термин «система» употребляется там, где речь идет о чем-то собранном вместе, упорядоченном, организованном, но иногда не упоминается критерий, по которому компоненты собраны, упорядочены, организованы. Главным является объяснить роль каждого элемента и возможность установить значение полученного исследователем любым способом результата. Польза системного подхода определяется тем, насколько успешно выделен системообразующий фактор и насколько полно установлено его значение для формирования системы (например, смачиваемость). Полезными будут лишь те математические выкладки, которые сформулированы с учетом важных системообразующих фак-

¹ Гарькина И.А. Модификаторы для серных композитов специального назначения // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2008. Т. 51, № 5. С. 70–75.

торов. Указанное позволяет рассматривать систему как комплекс избирательно вовлеченных компонентов, у которых взаимодействие и взаимоотношения принимают характер *взаимодействия компонентов на получение полезного результата*. Конкретным механизмом взаимодействия компонентов является освобождение их от избыточных степеней свободы, не требующихся для получения данного конкретного результата, и, наоборот, сохранение всех тех степеней свободы, которые способствуют получению результата. Теоретическое значение системного подхода состоит и в определении общих закономерностей, являющихся изоморфными для различных классов или явлений. Чем более значим критерий изоморфности, тем более выражен изоморфизм. Наиболее важным критерием изоморфности, естественно, является изоморфность системообразующего фактора. Стало очевидным, что только системный подход позволит разобраться в связях между отдельными фактами и на более высоком уровне осуществлять новые исследования.

Системный подход следует рассматривать не как порождение проходящей моды, а как явление, развитие которого связано с историей развития человеческой мысли². Основная системная проблема выражается в положении Аристотеля: «целое — больше суммы его частей». Свойства предметов и способы действия на высших уровнях не могут быть представлены в виде суммы свойств и действий изолированных компонентов. Однако при известном ансамбле компонентов и существующими между ними отношениями уже можно рассматривать систему как организованную целостность. Причинами того, что системные проблемы во многом до сих пор остаются философскими и до конца не сформировались как наука, являются методологическая неприспособленность традиционной науки для анализа отношений в системах и недостаточность имеющихся математических методов. Пока многочисленные успехи классической науки не привели к пересмотру ее фундаментальной парадигмы — однолинейной причинности при расчленении предмета исследования на элементарные составляющие.

Общая теория систем представляет собой логико-математическую область исследований, задача которой — формулировка общих принципов исследования систем. Осуществляемая в рамках этой теории точная формулировка понятий: целостность и сумма, дифференциация, централизация, иерархическое строение и т.п. — должна позволить применять эти понятия во всех дисциплинах, имеющих дело с системами. Тогда системные законы могут представляться в виде аналогий (законов, формально являющихся идентичными, но относящимися к описанию различных явлений в рамках разных дисциплин).

Несмотря на внешнюю простоту, очевидны затруднения в тривиальных ответах по реализации понятия «система» на различных уровнях наблюдаемого мира. Первым шагом может быть выделение реальных систем (воспринимаемых или выводимых из наблюдения и существующих независимо от наблюдателя). Однако символические конструкции (логика, математика и др.) также можно рассматривать как системы, а именно концептуальные системы (имеющие эквиваленты в реальности). В этом смысле их разграничение не всегда является простым. Система может быть охарактеризована только через взаимодействие составляющих элементов. Различие между реальными и концептуальными системами на уровне простого здравого смысла установить практически невозможно.

² Берталанфи Л. История и статус общей теории систем // Системные исследования. Ежегодник. М., 1973. С. 20–36.

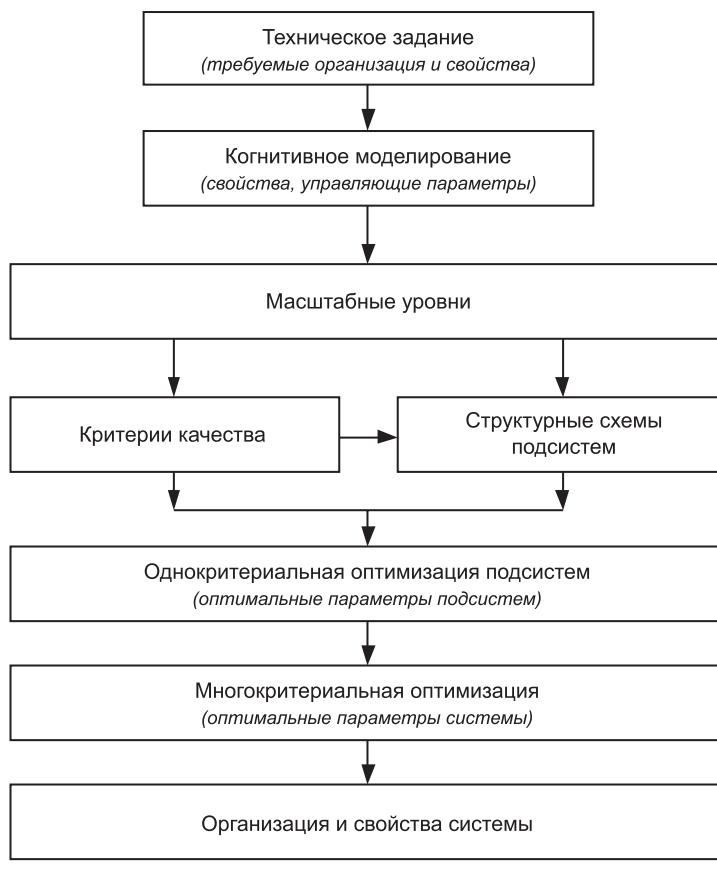
Различные аспекты функционирования системы всегда будут изучаться на основе разных моделей и соответствующих теорий, но именно это в конечном итоге может привести к их унификации.

Таким образом, общая теория систем, будучи научной теорией с широким диапазоном изучаемых вопросов, связанная с решением вечных философских проблем и попыткой найти на них ответы, фактически является моделью определенных общих аспектов реальности, позволяющих увидеть многое из того, что раньше не замечалось (или эти вопросы обходились). В этом основное методологическое значение теории систем.

Рассмотрим одну из возможных методологий проектирования систем. В ее основе — общая формулировка технического задания на проектирование (см. рисунок). Наблюданное усложнение решаемых задач приводит к увеличению сложности и стоимости проектирования; возрастают трудоемкость изготовления и время полного цикла создания. В частности, композиционные материалы нового поколения существенно отличаются от уже известных, традиционных, даже от их предшественников десяти-, двадцатилетней давности.

Цель проектирования остается прежней, но меняется подход к проектированию, его методология: разработка (синтез) проекта осуществляется методом моделирования (разработка частных моделей для описания отдельных свойств системы). Множество взаимосвязанных моделей с необходимой точностью будет описывать систему, отражая всю совокупность ее свойств. Естественно, объект рассматривается как система (системный объект):

- создается ради определенной цели;



Синтез сложной системы

- развивается (изменяется) в процессе достижения цели;
- управление осуществляется на основе информации о его состоянии и состоянии внешней среды с использованием моделирования поведения объекта;
- состоит из взаимосвязанных компонентов, выполняющих определенные функции;
- возможность управления свойствами целостной системы обеспечивается свойством эмерджентности.

Таким образом, фактически проектирование системы сводится к построению ее сложной модели. Проект системы объединяет частные, взаимосвязанные, взаимообусловленные модели. Определяется иерархия систем — расположение частей или элементов целого в порядке от высшего к низшему. Проект представляет собой ряд зависимостей между целями проектирования, возможными целями их достижения, окружающей средой и ресурсами. Можно рассматривать и как сложную модель, отражающую все интересующие свойства будущей реальной системы.

Выбор некоторого проектного решения из возможных альтернативных вариантов (средство достижения целей проектирования) осуществляется на основе некоторого показателя (критерия выбора), обобщенно характеризующего степень достижения поставленной цели тем или иным вариантом проекта. На этом этапе система рассматривается как совокупность взаимосвязанных, управляемых подсистем, объединенных общей целью функционирования для решения заданной проблемы в некотором диапазоне условий. При выборе рационального варианта и оптимизации его параметров желательно использовать показатель «эффективность — стоимость», отражающий соотношение между эффективностью решения поставленной задачи и суммарными затратами на решение (обеспечение максимальной эффективности при заданных затратах или минимальной стоимости при заданном уровне эффективности).

На систему влияют любые изменения внешней среды. Как правило, верно и обратное: свойства внешней среды изменяются в результате работы системы. Поэтому при проектировании системы с длительным периодом эксплуатации следует учитывать не только сегодняшнее состояние среды, но и прогнозируемые изменения.

Так как изменения параметров любого из компонентов сложной системы вызывают изменение работы всей системы и ее выходных параметров, то необходимо предусмотреть возможные отказы (нарушение работоспособности) подсистем с обеспечением передачи функций одной подсистемы другой. Для этого может использоваться резервирование подсистем (простейший случай — дублирование).

Отсутствие абсолютной уверенности в прогнозировании проектируемой системы приводит к необходимости предусмотреть возможность ее различных модификаций.

Наконец, проектирование с системных позиций — это проектирование части целого как элемента целого: критерием оценки является обобщенный показатель, обеспечивающий оптимальность всей системы в принятом смысле.

Примеры использования указанной методики к разработке материалов специального назначения нами рассматривались ранее в [2–4]. Была подтверждена ее эффективность. Однако, справедливости ради, отметим, что пока иерархическая структура композиционного материала (соответствующая иерархической структуре критериев качества) не дает четкого ее представления как сложно организованной системы, в которой постоянно происходит большое количество параллельных процессов. На опре-

деленном этапе формирования материала горизонтальные связи на каждом из уровней иерархии могут оказаться сравнимыми или даже превышать межуровневые связи. До конца остается неясным, каким образом на основе различных дифференцированных функций компонентов и их связей между собой определяется система с четкой самоорганизацией, даже при изменении внешних условий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуд, Г.Х. Системотехника : Введение в проектирование больших систем [Текст] / Г.Х. Гуд, Р.З. Макол. — М. : Сов. радио, 1962. — 383 с.
2. Гарькина, И.А. Строительные материалы как системы [Текст] / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, Е.В. Королев // Строит. материалы. — 2006. — № 7. — С. 55–58.
3. Гарькина, И.А. Управление качеством материалов со специальными свойствами [Текст] / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Проблемы управления. — 2008. — № 6. — С. 67–74.
4. Гарькина, И.А. Флокуляция в дисперсных системах [Текст] / И.А. Гарькина, А.М. Данилов, В.А. Смирнов // Системы управления и информационные технологии. — 2008. — № 2.3(32). — С. 344–347.

ДАНИЛОВ А.М., д-р техн. наук, проф.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

ГАРЬКИНА И.А., д-р техн. наук, доц.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено 26.12.10

Danilov A.M., doctor of technical sciences, professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Garkina I.A., doctor of technical sciences, assistant professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

THE METHODOLOGY OF THE DESIGN OF THE COMPLEX SYSTEMS DURING THE DEVELOPMENT OF THE SPECIAL-PURPOSE MATERIALS

The synthesis of the special-purpose materials are considered. Such a synthesis is based on the system approach and revised methodology of the design of complex systems.

Key words: complex systems, methodology of the design, system approach, application for development of composites.

REFERENCES

1. Good, G.H. System engineering: Introduction in design of the complex systems [Text] / G.H. Good, R.Z. Makol. — M. : Sov. radio, 1962. — 383 p.
2. Garkina, I.A. Building materials as systems [Text] / I.A. Garkina, A.M. Danilov, E.V. Korolyov // Building Materials. — 2006. — N 7. — P. 55–58.
3. Garkina, I.A. Quality management of the materials of special properties [Text] / I.A. Garkina, A.M. Danilov // Control Problems. — 2008. — N 6. — P. 67–74.
4. Garkina, I.A. Flocculation in disperse systems [Text] / I.A. Garkina, A.M. Danilov, V.A. Smirnov // Management Systems and Information Technologies. — 2008. — N 2.3(32). — P. 344–347.

УДК 624.072.22.016

В.М. ДОБРАЧЕВ, Я.В. ВОЛЬФ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЕРФОРИРОВАННЫХ БАЛКАХ

Представлены результаты расчета сталежелезобетонных перфорированных балок методом конечных элементов. В качестве объекта исследования приняты шарнирно опертые балки с круглыми и шестиугольными отверстиями в стальной стенке, загруженные равномерно распределенной погонной нагрузкой. Определены эпюры напряжений σ_x и τ_{xy} в характерных сечениях балки.

Ключевые слова: напряжения, перфорированная балка, сталежелезобетонная балка.

Отличительная особенность современных зданий — их насыщенность инженерными системами и коммуникациями, которые часто располагаются непосредственно под перекрытиями и могут при использовании в качестве несущих конструкций стальных перфорированных балок (ПБ) пропускаться через отверстия в стенке. Объединение ПБ с железобетонной плитой перекрытия (покрытия) позволяет существенно снизить расход стали. Варианты использования в верхней и нижней частях ПБ разных профилей, выполненных из разных сталей (нижняя часть из более прочной стали), а также вставок в стенку могут еще более повысить эффективность таких конструкций.

Исследования сталежелезобетонных балок в составе перекрытий проводились во многих странах и продолжаются по настоящее время. Так, в Белорусском политехническом институте в 1980-х годах выполнены экспериментальные исследования сталежелезобетонных балок с отверстиями в стальной стенке [1, 2], которые затем были применены в перекрытиях под очень большие временные нагрузки (от 5 до 10 тс/м²). Информации о применении сталежелезобетонных ПБ (с регулярными отверстиями) в отечественной литературе явно недостаточно, что существенно ограничивает возможность их применения в составе сталежелезобетонных перекрытий. Однако за рубежом подобные конструкции широко применяются в зданиях различного назначения [3, 4].

Для выявления критериев расчетного предельного состояния по прочности сталежелезобетонных ПБ проведено численное исследование. Задача решалась с использованием метода конечных элементов в ПВК «ЛИРА». Определение напряженного состояния велось по недеформированной схеме без учета стадий работы сталежелезобетонной конструкции. Исследование выполнялось в упругой стадии работы в предположении справедливости гипотезы плоских сечений.

Для анализа на данном этапе выбраны два вида ПБ: с шестиугольными и круглыми отверстиями. Пролет моделей балок принят 3400 мм, остальные параметры приведены на рис. 1. Расчет производился для шарнирно опертой балки, загруженной равномерно распределенной погонной нагрузкой. Шарнирное опирание производилось на нижнюю полку ПБ. На этом участке стенка принята без отверстий и подкреплена двусторонними ребрами жесткости. Также с помощью связей опорные сечения

© Добрачев В.М., Вольф Я.В., 2011

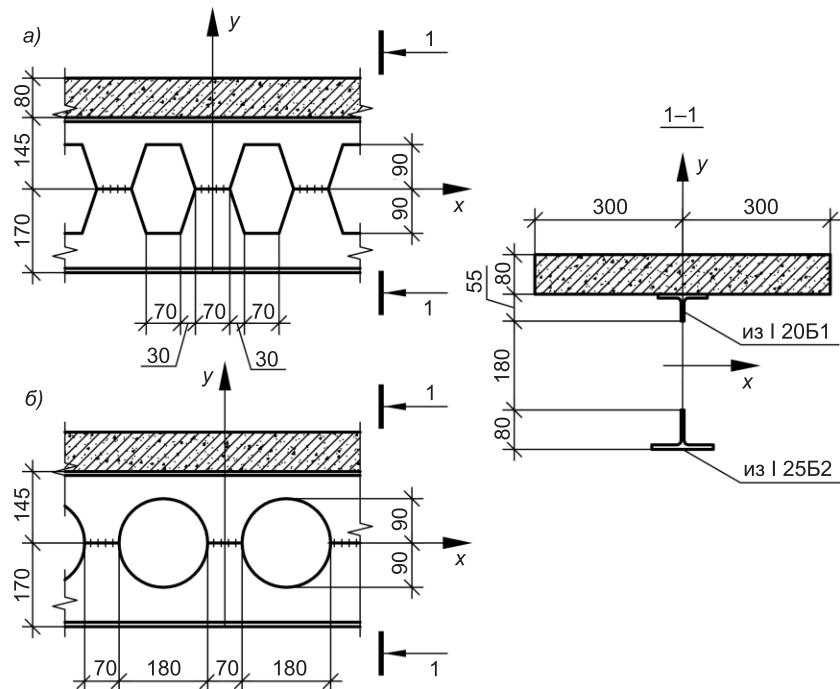


Рис. 1. Геометрические характеристики балок с шестиугольными (а) и круглыми (б) отверстиями

были раскреплены от поворота из плоскости. Стальная часть моделей выполнялась из малоуглеродистой стали С245, а железобетонная — из тяжелого бетона класса В20 и арматуры А400С.

Для реализации модели перфорированной балки перекрытия использованы четырехугольные КЭ44 — универсальные конечные элементы (КЭ) оболочки. Для реализации модели железобетонной части сечения использованы объемные восьмиузловые КЭ36 — для бетона и пространственные стержневые элементы, расположенные между узлами объемных элементов поперек оси балки, — для арматуры. При диаметре арматуры 8...10 мм с шагом 200 мм ее влияние на распределение напряжений по рассматриваемым объединенным сечениям не выявлено. В направлении вдоль оси балки арматура не устанавливалась. Связь между железобетонной и стальной частями сечения осуществлялась с помощью жестких упоров (стальные уголки из объемных восьмиузловых КЭ36, установленные равномерно по длине по одному над каждым сплошностенчатым участком ПБ), находящихся в теле железобетонной части сечения и объединенных с верхним поясом ПБ. По остальной зоне контакта вводились вертикально ориентированные упругие связи (КЭ261).

Фрагмент конечно-элементной модели балки представлен на рис. 2. Размеры КЭ разных типов находились в интервале от 5 до 10 мм вследствие сложной геометрии исследуемой модели. Значения нормальных и касательных напряжений вычислялись в центрах тяжести КЭ. По полученным значениям строились эпюры напряжений σ_x , τ_{xy} на графиках в осях координата — напряжение по сечениям, приведенным на рис. 3.

В данной работе рассматривались два характерных участка:

- участок с изгибающим моментом, близким к максимальному, и наличием небольшой поперечной силы (у середины пролета);
- участок с близкой к максимальной поперечной силой и наличием небольшого изгибающего момента (в приопорном сечении).

Распределение напряжений в остальных сечениях по длине балки представляет собой комбинацию вышеописанных крайних сечений. Для более удобного чтения эпюор значения нормальных и касательных напряжений в железобетонной части сечения увеличены против исходных в 10 раз.

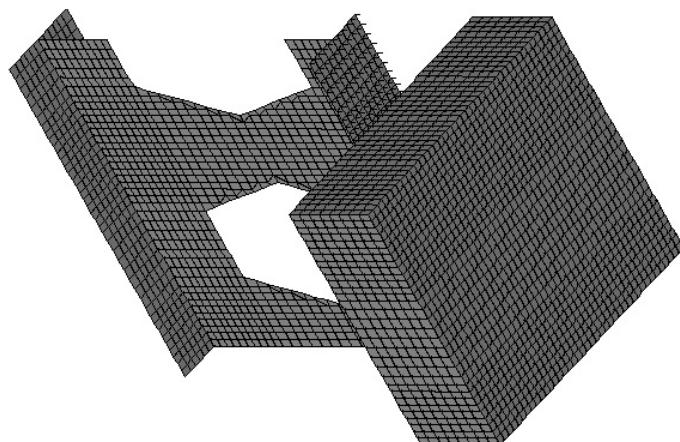


Рис. 2. Фрагмент конечно-элементной модели балки

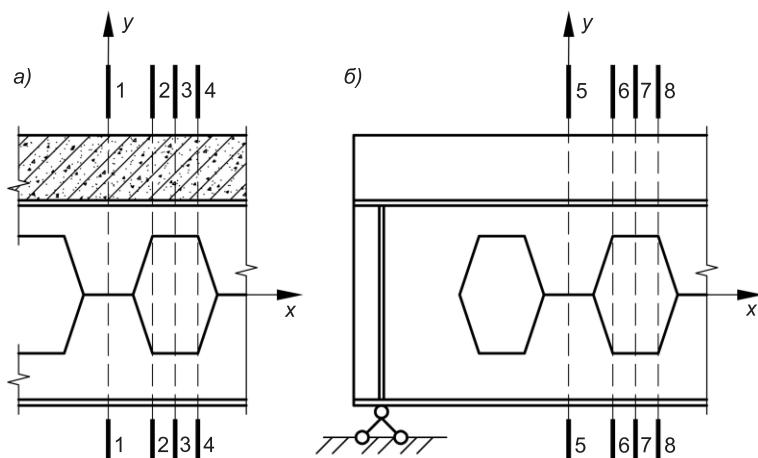


Рис. 3. Схемы расположения сечений для определения напряжений σ_x и τ_{xy}

Для выявления качественной картины распределения напряжений было вычислено положение нейтральной оси при условии, что сдвиг на границе элементов, составляющих сечение, отсутствует и эпюры деформаций выглядят как на рис. 4. Следует отметить, что эпюра деформаций объединенного сечения может быть получена суммированием эпюр деформаций необъединенного сечения: от моментов и продольных усилий, приложенных по центрам тяжести составляющих сечения элементов. Так как деформации составляющих элементов от изгибающих моментов на уровне их центров тяжести равны нулю, деформации в объединенном сечении на этих же уровнях вызываются только продольными усилиями. Поэтому значения продольных усилий, которые могут возникнуть в сечении, рассчитываются следующим образом:

$$N_c = \varepsilon_c E_c A_c = k r_{sc} E_c A_c, \quad N_s = \varepsilon_s E_s A_s = k(r - r_{sc}) E_s A_s. \quad (1)$$

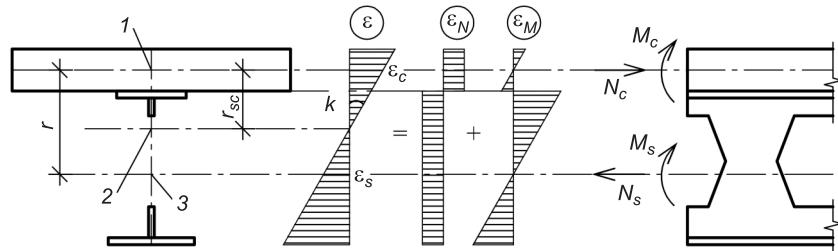


Рис. 4. К определению положения нейтральной оси объединенного сечения

1 — центр тяжести железобетонного сечения; 2 — центр тяжести объединенного сечения;
3 — центр тяжести ПБ

Из условия равенства продольных усилий в железобетонной и стальной частях сечения $N_c = N_s$ расстояние между центром тяжести железобетонного участка и центром тяжести объединенного сечения можно определить следующим образом:

$$r_{sc} = \frac{E_s A_s r}{E_c A_c + E_s A_s}. \quad (2)$$

Геометрические характеристики стальной ПБ устанавливались по сечению с отверстием и сплошностенчатому участку. Было определено, что нейтральная ось объединенного сечения на сплошностенчатых участках находится ниже по сравнению с участками с отверстиями в стальной стенке, но не выходит за границы стенки верхнего тавра стальной перфорированной балки.

Анализ представляемых эпюр напряжений позволяет выявить ряд характерных особенностей работы сталежелезобетонных перфорированных балок. На рис. 5 представлены графики нормальных напряжений σ_x в сечениях, ближайших к середине пролета. При их рассмотрении можно отметить, что наибольшие величины напряжений имеют место на кромках сечения и вызваны действием общего изгибающего момента. При этом напряжения в нижнем поясе стальной балки в середине пролета значительно превосходят соответствующие напряжения в верхнем поясе (до 20 раз) в связи с близким расположением нейтральной оси к верхнему

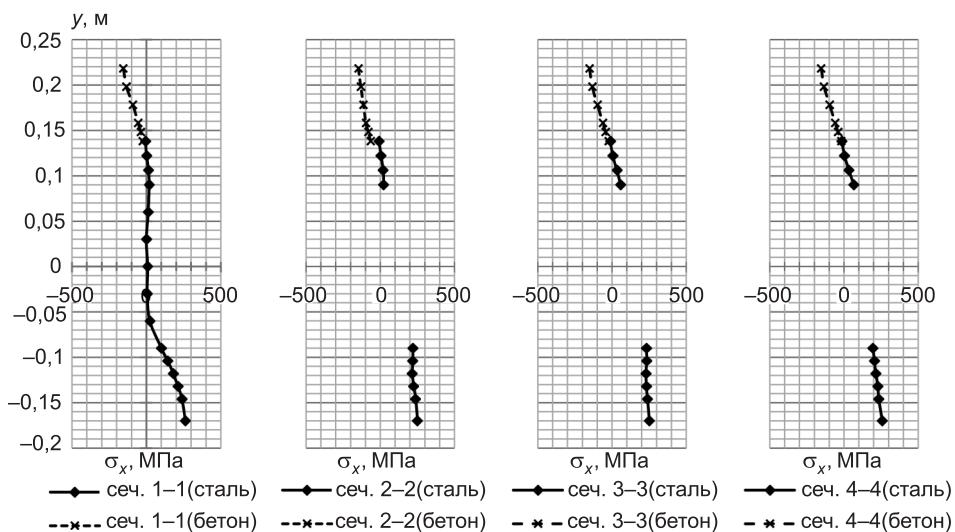


Рис. 5. Нормальные напряжения σ_x в объединенной балке (сечения, ближайшие к середине пролета; напряжения в железобетонной части увеличены в 10 раз)

поясу стальной балки. Нормальные напряжения в сечении стальной стенки-перемычки перфорированной балки криволинейны и отличаются от расчетного линейного распределения по формулам сопротивления материалов¹. Напряжения σ_x в железобетонной части объединенного сечения остаются практически линейными по высоте, за исключением нижней кромки, где заметны незначительные отклонения от действия поперечной силы. Более детально это будет рассмотрено в припорных сечениях.

На рис. 6 представлены графики нормальных напряжений σ_x в припорных сечениях балки, по которым видно, что неравномерность напряжений в ней в районе отверстий между верхним и нижним таврами несколько сглаживается, особенно в точках на кромках отверстий. Это и объясняется увеличением местных изгибающих моментов от возрастающей поперечной силы с одновременным уменьшением общего изгибающего момента. Стоит отметить, что в сечениях 6–6 и 8–8 (над крайними точками шестиугольных отверстий стальной балки) в нижней части железобетонной части сечения нормальные напряжения существенно отклоняются от линейного распределения. Влияние местных изгибающих моментов от поперечной силы настолько высоко, что в сечении над отверстием (в сечении 8–8) в нижней части железобетонного сечения возникают растягивающие напряжения, несмотря на то что эти точки находятся выше нейтральной оси. Экстремальные значения напряжений до двух раз превышают средние напряжения, а их влияние имеет локальный характер.

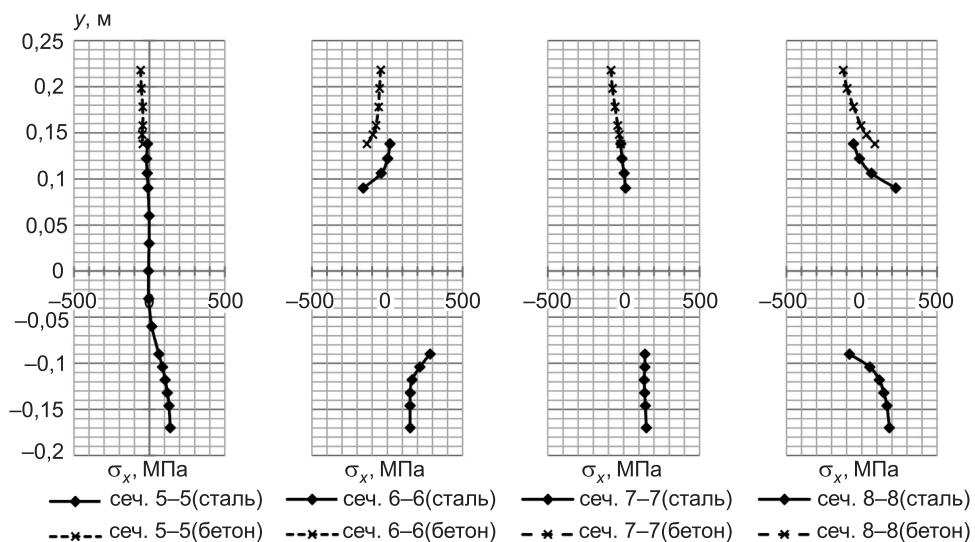


Рис. 6. Нормальные напряжения σ_x в объединенной балке (сечения, близайшие к опоре; напряжения в железобетонной части увеличены в 10 раз)

На рис. 7 представлены эпюры напряжений τ_{xy} , которые рассматривались в четырех сечениях, характерных для перфорированных балок. Сечения располагались на самом близком к опоре участке, где влияние поперечной силы максимально. Касательные напряжения в железобетонной части сечения имеют криволинейное очертание и стремятся приблизиться к нулю у верхней и нижней кромок. Наличие касательных напря-

¹ Добрачев В.М., Литвинов Е.В. Распределение напряжений в стенке-перемычке перфорированной балки // Изв. вузов. Строительство. 2002. № 10. С. 124–128.

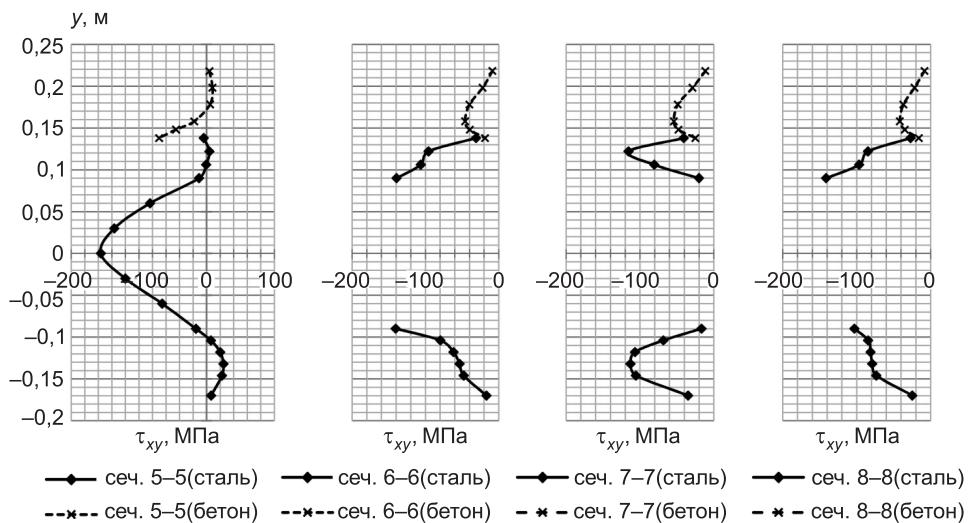


Рис. 7. Касательные напряжения τ_{xy} в объединенной балке (сечения, ближайшие к опоре; напряжения в железобетонной части увеличены в 10 раз)

жений свидетельствует о том, что часть поперечной силы воспринимается железобетонной частью сечения и это должно положительно сказываться на работе перфорированной балки. Максимальные значения касательных напряжений в стальной стенке-перемычке возникают вблизи ее нейтральной линии (в сечении 5–5 на рис. 7), а также в углах отверстий, являющихся концентраторами напряжений (в сечениях 6–6, 8–8).

Все вышеописанные напряжения представлены для балки с шестиугольными отверстиями. Для балок с круглыми отверстиями в стальной стенке общие принципы распределения напряжений сохраняются с менее ярко выраженнымами всплесками напряжений ввиду отсутствия резких изменений сечения и концентраторов напряжений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Мартынов, Ю.С. Сталь-железобетонные конструкции в промышленном и гражданском строительстве Белорусской ССР. Опыт разработки и внедрения [Текст] / Ю.С. Мартынов — Мин. : БелНИИНТИ, 1989. — 58 с.
- Мартынов, Ю.С. К расчету сталежелезобетонных балок с отверстиями в стенках [Текст] / Ю.С. Мартынов, А.Г. Вербицкий // Эффективные строительные конструкции производственных зданий. — Мин., 1986. — С. 27–33.
- Wang, A.J. Advanced finite element modelling of perforated composite beams with flexible shear connectors [Text] / A.J. Wang, K.F. Chung // Engineering Structures. — 2008. — N 30. — P. 2724–2738.
- Redwood, R.G. Behaviour of composite castellated beams [Text] / R.G. Redwood // Structural Engineering. — 2000. — N 2. — P. 164–168.

ДОБРАЧЕВ В.М., канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ВОЛЬФ Я.В., ст. препод.; E-mail: jaroslav_83@mail.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 14.12.10

Dobrachev V.M., candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Wolf Ya.V., senior lecturer; E-mail: jaroslav_83@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

STRESS DISTRIBUTION IN THE STEEL PERFORATED COMPOSITE BEAMS

They are presented results of calculation of the steel perforated composite beams by a method of finite elements. Beams with hinged supports at the end sides, with round and hexangular holes in the steel web, loaded by an even load were subjects of inquiry. Values of tensions σ_x and τ_{xy} in different cross-sections of perforated composite beam are defined.

Key words: tension, perforated beam, composite beam.

REFERENCES

1. Martynov, Yu.S. Composite structures in industrial and civil construction of the Belarusian SSR. Experience in developing and implementing [Text] / Yu.S. Martynov. — Minsk : BelNIINTI, 1989. — 58 p.
2. Martynov, Yu.S. Calculation of composite beams with holes in the steel walls [Text] / Yu.S. Martynov, A.G. Verbitsky // Efficient constructions of industrial buildings. — Minsk, 1986. — P. 27–33.
3. Wang, A.J. Advanced finite element modelling of perforated composite beams with flexible shear connectors [Text] / A.J. Wang, K.F. Chung // Engineering Structures. — 2008. — N 30. — P. 2724–2738.
4. Redwood, R.G. Behaviour of composite castellated beams [Text] / R.G. Redwood // Structural Engineering. — 2000. — N 2. — P. 164–168.

УДК 691.57:536.2

Д.Ю. КОРОЛЕВ, О.В. ТЕРТЫЧНЫЙ, В.Н. СЕМЕНОВ, Т.В. ЩУКИНА

**ФАСАДНЫЕ КРАСКИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ
И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДЕНИЙ
ПРИ ИХ ПРИМЕНЕНИИ**

Рассматриваются теплозащитные свойства новых окрасочных материалов на основе Moutrical. Приводятся расчеты теплотехнических экспериментальных исследований Moutrical. Выявлен характер изменения теплопроводности в зависимости от количества нанесенных слоев. Выполнен анализ фасадной краски как теплоизолирующего покрытия при стационарном режиме с условием изменения коэффициента теплопроводности по его толщине.

Ключевые слова: фасадные краски, теплозащитные свойства материалов.

Интенсивное ресурсопотребление, значительная часть которого приходится на коммунальный сектор экономики, стимулирует разработку и проведение различного рода энергосберегающих мероприятий. К ним относятся и такие эффективные способы снижения энергоемкости, как сокращение теплопотерь, в том числе и наружными ограждениями зданий. Но существенное повышение теплозащитных свойств строительных конструкций, связанное со значительными капитальными вложениями, не всегда обоснованно, что наиболее очевидно для зданий, эксплуатирующихся свыше 10 лет и, как следствие, не соответствующих современным нормативам по энергоэффективности.

Качественное утепление наружных ограждений на уровне требуемых теплотехнических и стоимостных показателей не утрачивает своей актуальности, даже несмотря на широкий выбор применяемых для этой цели материалов. Многие из них в процессе длительной эксплуатации, сопровождающейся постепенным разрушением первоначальной структуры, перестают соответствовать своим свойствам [1], тем самым вызывая резкое возрастание потерь теплоты. При этом дополнительные капитальные вложения на обустройство тепловой изоляции для строительных конструкций будут иметь значительный срок окупаемости.

Указанные недостатки современных средств утепления зданий стимулируют активный поиск новых эффективных решений в этом направлении, выдвигая на первый план нанотехнологии. Использование указанных методов производства позволит получать изолирующие покрытия, имеющие на порядок более высокий уровень теплозащитных свойств, чем в применяемых в настоящее время материалах.

Появившиеся в результате последних разработок на российском рынке фасадные краски «Наноакрил™-фасад», «Теплокрас», «Теплос-топ», «Аврора», «Корунд», «Moutrical» и т.д. характеризуются низкой теплопроводностью, достигающей, по сведениям производителей, $0,001 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$. Данные теплотехнические параметры при окраске здания будут способствовать сокращению потерь теплоты наружными ограждениями, что при значитель-

© Королев Д.Ю., Тертычный О.В., Семенов В.Н., Щукина Т.В., 2011

ных размерах объектов застройки может обеспечить существенную экономию тепловой энергии в отопительный сезон [2].

Производители новых окрасочных материалов, как правило, не приводят точных значений коэффициентов теплопроводности и не оценивают влияние на теплозащитные свойства количества нанесенных слоев. Поэтому для точного прогнозирования эффекта снижения потребления тепловой энергии в системах отопления зданий необходимо проведение исследований свойств появляющихся фасадных красок.

Отсутствие необходимой информационной базы по теплозащитным параметрам новых покрытий стало основанием для проведения работ Воронежским государственным архитектурно-строительным университетом по изучению свойств окрасочных материалов в условиях, приближенных к реальной эксплуатации зданий.

Первые результаты экспериментальных исследований окрасочного материала Moutrical показали несомненное преимущество данного покрытия в достижении энергосбережения зданиями с фасадным окрашиванием наружных стен (см. таблицу). Состав Moutrical, который наносился на фрагмент кирпичной кладки в один или несколько слоев, после его высыхания подвергался поэтапному испытанию на лабораторной установке (рис. 1).

Итоговые значения коэффициента теплопроводности покрытия Moutrical по результатам расчетов*

Количество слоев покрытия Moutrical	Фактическая толщина покрытия, м	Значения коэффициента теплопроводности λ_m , Вт/(м · °C)
1 слой с холодной стороны	0,0004	0,0015
2 слоя с холодной стороны	0,00087	0,0027
3 слоя с холодной стороны	0,0014	0,0048
4 слоя с холодной стороны	0,00187	0,0061
5 слоев с холодной стороны	0,00233	0,0084
5 слоев с холодной стороны и 1 слой с теплой стороны	<u>0,00233</u> <u>0,0005</u>	0,0092
5 слоев с холодной стороны и 2 слоя с теплой стороны	<u>0,00233</u> <u>0,001</u>	0,0083
5 слоев с холодной стороны и 3 слоя с теплой стороны	<u>0,00233</u> <u>0,0013</u>	0,0086
<i>Статистические характеристики</i>		
По всем слоям	λ_m^{cp} , Вт/(м · °C)	0,0062
	Среднеквадратическое отклонение, Вт/(м · °C)	0,0024
По первым двум	λ_m^{cp} , Вт/(м · °C)	0,0021
	Среднеквадратическое отклонение, Вт/(м · °C)	0,00045
По последующим слоям	λ_m^{cp} , Вт/(м · °C)	0,0076
	Среднеквадратическое отклонение, Вт/(м · °C)	0,0014

* Над чертой приведены значения для основных слоев покрытия Moutrical с холодной стороны, под чертой — для дополнительных слоев Moutrical с теплой стороны.

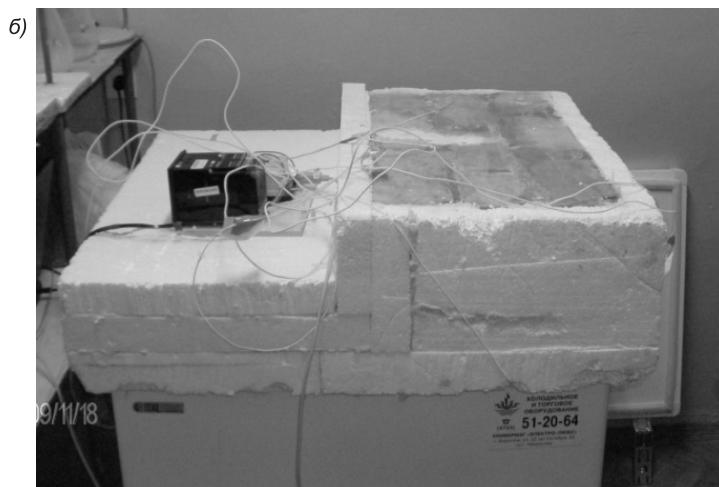
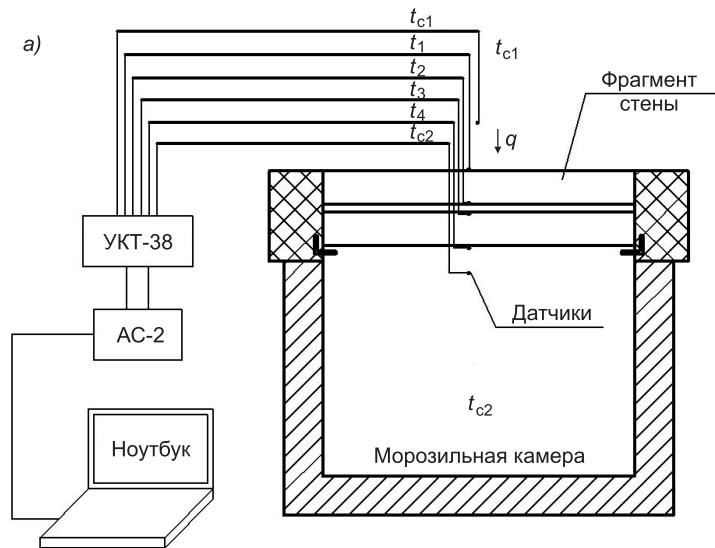


Рис. 1. Модельная установка для исследования тепловых характеристик стены

a) — принципиальная схема; б) — фактическая установка

На первом этапе с помощью прибора для определения теплопроводности материалов ИТС-1 получены значения коэффициентов теплопроводности силикатного кирпича, цементно-песчаного раствора и покрытия.

На втором этапе фрагмент стены с покрытием в качестве ограждающей конструкции смонтирован на морозильную камеру, с помощью которой создавались тепловой поток и градиент температур.

В качестве температурных датчиков использовались поверхностные термоэлектрические преобразователи ДТПЛ011-0,5 / 1,5. Измерения производились с помощью восьмиканального измерителя температур УКТ-38 (ОВЕН). Оцифровка и фиксация результатов измерений осуществлялись с помощью адаптера сети АС-2(ОВЕН) в комплекте с портативным ПК (ACER) в режиме online с периодом записи 5 мин. Для выполнения исследований одновременно включались в работу морозильная камера и система сбора информации, а затем производились необходимые измерения, которые впоследствии математически обрабатывались.

В таблице приведены более точные результаты экспериментальных измерений, которые получены на втором этапе исследований. Расчеты подтвердили высокую энергоэффективность Moutrical как теплоизоляционного покрытия при нанесении его не более чем в два слоя. При дальнейшей окраске теплозащитные свойства данного материала снижаются примерно в три раза. Для выполнения теплотехнических расчетов наружных ограждений, точность которых влияет на требуемую тепловую нагрузку для систем отопления зданий, следует применять средние значения теплопроводности:

- для двухслойного покрытия $\lambda_m = 0,0021 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$;
- для многослойного покрытия $\lambda_m = 0,0076 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

Учитывая полученные характеристики для окрасочного покрытия, Moutrical целесообразно рекомендовать в качестве теплоизоляционного материала, особенно для зданий, представляющих историческую и архитектурную ценность, так как рекомендуемое утепление ограждений с их наружной стороны известными средствами в данном случае не может быть осуществлено.

Полученные коэффициенты теплопроводности на порядок меньше, чем у современных эффективных теплоизолирующих материалов, применяемых в строительстве, поэтому нанесенное покрытие Moutrical даже при его незначительной толщине обеспечит снижение теплопотерь наружными стенами. Кроме того, кратковременность производства работ при окрашивании относительно дорогим составом является дополнительным стимулирующим условием активного использования Moutrical.

Чтобы оценить снижение теплового потока через наружные стены при применении данного окрасочного материала, необходимо рассмотреть возникаемый температурный режим в наружном ограждении. Изменение теплопроводности Moutrical в зависимости от количества нанесенных слоев на конструкции, т.е. от толщины покрытия, может быть с достаточной точностью (среднеквадратичное отклонение составляет 0,03) аппроксимировано выражением

$$\lambda_m = 0,0012e^{878,75x}, \quad (1)$$

где x — ось, направленная по толщине наружного ограждения в слое покрытия (рис. 2), или после введения обозначений может быть записано в следующей форме:

$$\lambda_m = b_0 e^{b_1 x}. \quad (2)$$

Такое изменение теплопроводности объясняется увеличением плотности материала при многослойном покрытии за счет снижения его пористости [3], отчасти вызванной первоначальной шероховатостью обрабатываемой поверхности.

Рассматривая тепловой режим ограждений в холодный период года, следует отметить, что среднесуточное колебание температур наружного воздуха будет

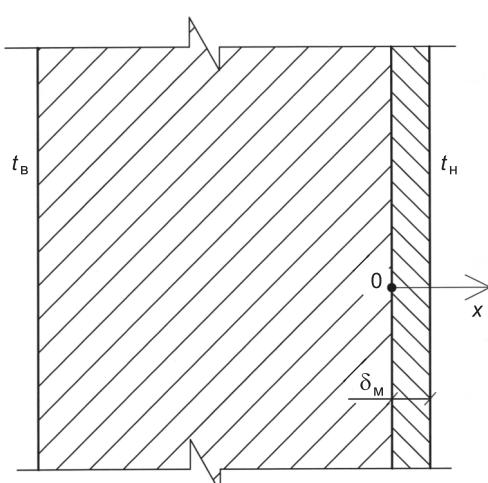


Рис. 2. Схема наружного ограждения с теплоизоляционным покрытием

незначительным и это дает основание считать процесс потери теплоты стационарным и соответствующим уравнениям:

$$\frac{d^2t}{dx^2} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{dt}{dx} = -\frac{\alpha_h}{\lambda_m} (t_{hp} - t_h), \quad (4)$$

где t_{hp} , t_h — температура на наружной поверхности ограждения и наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$;

λ_m — коэффициент теплопроводности материала строительной конструкции, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$;

α_h — коэффициент теплоотдачи наружной поверхности ограждающей конструкции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

С учетом зависимости (2) выражение (4) принимает вид

$$\frac{dt}{dx} = -\frac{\alpha_h}{b_0 e^{b_1 x}} (t_{hp} - t_h). \quad (5)$$

Интегрируя (5) и используя граничное условие $x = 0$, $t = t_{rp}$, получаем следующее распределение температур в слое рассматриваемого покрытия:

$$t = t_{rp} - \frac{\alpha_h}{b_0 b_1} (t_{hp} - t_h) \left(1 - \frac{1}{e^{b_1 x}} \right), \quad (6)$$

где t_{rp} — температура на границе оштукатуренной поверхности наружного ограждения и окрасочного материала, $^{\circ}\text{C}$.

Чтобы оценить характер изменения температуры в тонком слое покрытия и ее влияние на температурный режим конструкции в целом, рассмотрим его возможный диапазон в стене из силикатного кирпича с учетом оштукатуренных внутренней и наружной поверхностей, имеющей общую толщину 530 мм. Так как силикатный кирпич и используемый цементно-песчаный раствор имеют одинаковое значение теплопроводности, то в этом случае наружное ограждение можно считать двухслойным, в котором внешний слой выполнен посредством Moultrical.

Для определения коэффициента теплоотдачи воспользуемся следующей формулой из работы [4]:

$$\alpha_h = 7,34V^{0,656} + 3,78e^{-1,91V}. \quad (7)$$

Как показывают результаты расчетов для климатических условий Воронежской области, приведенные на рис. 3, столь пренебрежимо тонкий

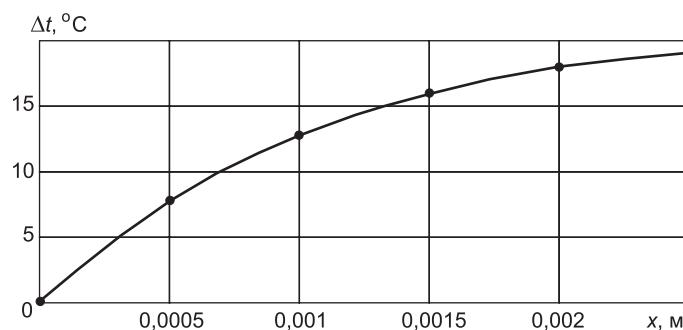


Рис. 3. Перепад температур на границе наружного ограждения и в покрытии Moultrical в зависимости от координаты x

слой покрытия Moutrical позволяет существенно сдерживать падение температур в несущей конструкции наружной стены. Характер изменения температурного режима подтверждает наибольшее влияние двух первых слоев покрытия и снижение его эффективности при последующем нанесении на поверхность наружного ограждения.

Применение Moutrical для зданий, имеющих длительный срок эксплуатации, позволяет не только сократить теплопотери и тем самым повысить их энергоэффективность, но и защитить зону конденсационной влаги от воздействия отрицательных температур. Это в свою очередь создает условия для нормальных тепло- и влажностных режимов конструкций и значительно увеличивает сроки эксплуатации зданий без проведения капитальных ремонтов. Фасадные краски подобных свойств при снижении их себестоимости найдут широкое применение в строительстве, поскольку это высококачественный отделочный материал со сроком службы более 10 лет и он обладает энергосберегающим эффектом.

Проведенные на данном этапе исследования и полученные результаты дают основание предположить, что в дальнейшем для сокращения потерь теплоты будут разрабатываться и применяться окрасочные материалы, расширяющиеся и вспенивающиеся при их нанесении на поверхность ограждения. Такая технология создания защитного покрытия толщиной в несколько миллиметров обеспечит существенное термическое сопротивление на пути теплового потока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самарин, О.Д. Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность [Текст] / О.Д. Самарин. — М. : Изд-во Ассоциации строит. вузов, 2009. — 296 с.
2. Семенов, В.Н. Пути снижения теплопотерь ограждающими конструкциями зданий и поиск новых подходов [Текст] / В.Н. Семенов, Д.Ю. Королев // Инженерные системы и сооружения : Тр. Воронеж. гос. архит.-строит. ун-та. — 2010. — № 1(2). — С. 39–43.
3. Щукина, Т.В. О теплопроводности отложений на теплообменных поверхностях в системах теплоснабжения [Текст] / Т.В. Щукина, Е.Н. Комисарова // Изв. вузов. Строительство. — 2001. — № 8. — С. 99–102.
4. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий [Текст] / К.Ф. Фокин / Под. ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина. — М. : АВОК-ПРЕСС, 2006. — 256 с.

КОРОЛЕВ Д.Ю., асп.

*Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
ТЕРТЬЧНЫЙ О.В., асп.*

*Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
СЕМЕНОВ В.Н., канд. техн. наук, проф.*

*Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
ЩУКИНА Т.В., канд. техн. наук, доц.*

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 11.01.11

Korolev D.Yu., post-graduate student, Voronezh State Architecturally-Building University, Russia

Tertychny O.V., post-graduate student, Voronezh State Architecturally-Building University, Russia

Semenov V.N., candidate of technical sciences, professor, Voronezh State Architecturally-Building University, Russia

Shchukina T.V., candidate of technical sciences, assistant professor, Voronezh State Architecturally-Building University, Russia

FRONT PAINTS OF NEW GENERATION AND TEMPERATURE MODE OF EXTERNAL PROTECTIONS AT THEIR APPLICATION

Protective properties of new painting materials on example Moutrical are investigated. Results of experimental researches Moutrical are resulted. Character of change of heat conductivity depending on quantity of the put layers is revealed. The analysis of a front paint as isolating covering is made at a stationary mode with a condition of change of factor of heat conductivity on its thickness.

Key words: front paints, protective properties of materials from warmth losses.

REFERENCES

1. Samarin, O.D. Thermophysics. Energy savings. Efficiency of Savings of energy [Text] / O.D. Samarin. — M. : Publ. House of Association of Building High Schools, 2009. — 296 p.
 2. Semenov, V.N. Ways of decrease in losses of warmth protecting designs of buildings and search of new approaches [Text] / V.N. Semenov, D.Yu. Korolev // Engineering systems and constructions : Proc. Voronezh State Architecturally-Building University, 2010. — N 1 (2). — P. 39–43.
 3. Shchukina, T.V. About heat conductivity of adjournment on heat exchange surfaces in heat supply systems [Text] / T.V. Shchukina, E.N. Komisarova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2001. — N 8. — P. 99–102.
 4. Fokin, K.F. Building of the heating engineer of protecting parts of buildings [Text] / K.F. Fokin / Ed. by Yu.A. Tabunshchikova, V.G. Gagarina. — M. : AVOK-PRESS, 2006. — 256 p.
-

УДК 624.131.23:539.3

Г.И. ШВЕЦОВ, Л.В. ХАЛТУРИНА

**СТРУКТУРНО-ФАЗОВАЯ ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ
ЛЕССОВЫХ ГРУНТОВ В ПРИРОДНЫХ УСЛОВИЯХ
И В ОСНОВАНИЯХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Обобщены результаты исследований структурной прочности, деформационной анизотропии лессовых грунтов, изменения их свойств под влиянием внешних нагрузок и других факторов, в том числе в основаниях длительно эксплуатируемых зданий. Даны основные рекомендации по практическому использованию полученных результатов в расчетах грунтовых оснований.

Ключевые слова: лессовые грунты, грунтовые основания, деформируемость, структурная прочность, деформационная анизотропия.

Существующие методы расчетов грунтовых оснований, регламентируемые СНиП 2.02.01–83*, не в полной мере учитывают реальные процессы, происходящие в грунтах и грунтовых основаниях под воздействием внешних нагрузок и других факторов. При постоянно растущих требованиях к надежности и экономичности возводимых и эксплуатируемых зданий и сооружений уточнение существующих методов расчета может быть достигнуто учетом свойств конкретных грунтов, характерных для различных регионов. Широкое распространение в Западной Сибири особых инженерно-геологических образований — лессовых грунтов — и большие масштабы строительства на этих грунтах обусловили многолетние экспериментально-теоретические исследования, проводимые под руководством Г.И. Швецова на кафедре «Основания, фундаменты, инженерная геология и геодезия» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. Исследования доказывают, что при расчете грунтовых оснований, сложенных лессовыми грунтами, необходимо дополнительно учитывать структурные характеристики грунтов, их деформационную анизотропию, формирование новой структуры грунта при длительной эксплуатации зданий за счет изменения химико-минералогического состава поровой воды в грунте и связанные с ними изменения прочности индивидуальных контактов частиц грунта.

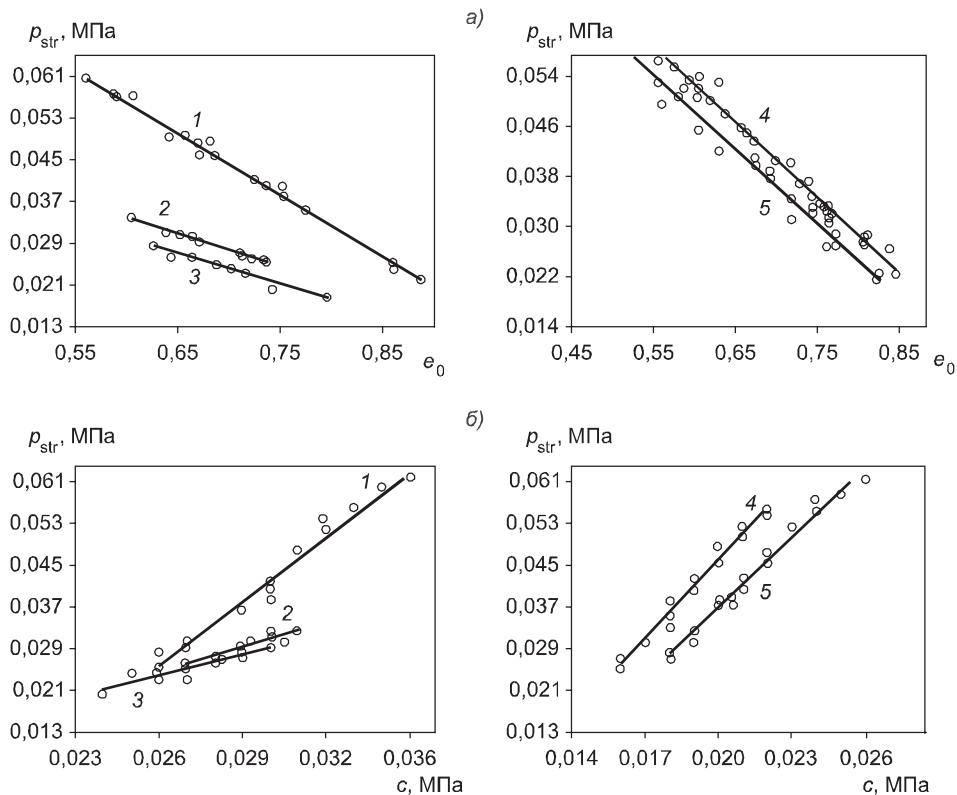
Учет структурных характеристик грунта при оценке его сжимаемости имеет важное практическое значение и позволяет, в частности, более точно определить глубину сжимаемой зоны оснований при расчете осадок фундаментов. Заложенный в СНиП 2.02.01–83* критерий установления глубины сжимаемой толщи принят условно и не отражает фактического распространения деформаций по глубине основания. В результате этого в расчетах, как правило, получаются завышенные глубины сжимаемой толщи. Определение нижней границы сжимаемой толщи — необходимое условие расчета не только традиционными методами, но и с помощью современных геотехнических программных комплексов. Многие программы конечно-элементного анализа, использующие нелинейные модели грунтов, не позволяют автоматически определять границу сжимаемой толщи.

© Швецов Г.И., Халтурина Л.В., 2011

Одной из характеристик грунта является его структурная прочность, т.е. величина давления, до достижения которой грунт, можно считать, работает как упругое тело. На графике компрессионных испытаний она определяется по граничному значению участка, близкого к горизонтальному. Экспериментальные компрессионные кривые лесовых супесей и суглинков в маловлажном и влажном состояниях при различных коэффициентах пористости имеют идентичное очертание — криволинейное с начальным участком, отличающимся незначительным приращением деформаций с ростом вертикальных давлений. Практически горизонтальные участки на компрессионных кривых обусловлены наличием у лесовых грунтов прочных структурных связей.

Исследования (доц. М.А. Осипова) показали, что величина структурной прочности зависит в первую очередь от коэффициента пористости и удельного сцепления лесового грунта (рис. 1). Эти зависимости имеют хорошо выраженный прямолинейный характер: с ростом коэффициента пористости и влажности структурная прочность уменьшается, а с ростом сцепления — увеличивается. На структурную прочность значительно влияет также консистенция глинистого грунта: и для суглинков, и для супесей с понижением показателя текучести I_L значения структурной прочности увеличиваются.

Величины структурной прочности для лесовых супесей составляют 0,013...0,054 МПа, для лесовых суглинков они несколько выше (0,013...0,061 МПа). Разрушение структурных связей после приложения нагрузок, превышающих структурную прочность исследуемых грунтов,



Зависимости структурной прочности грунта p_{str} от коэффициента пористости e_0 (а) и удельного сцепления c (б)

Кривые 1–3 для суглинка лесового твердого, полутвердого, тугопластичного соответственно; кривые 4, 5 — для супеси лесовой твердой и пластичной

Таблица 1

Региональная инженерно-геологическая классификация лесовых пород Приобского плато

Тип грунта	Вид грунта	p_{str} , МПа	ρ_s , г/см ³	ρ , г/см ³	W , %	e	W_L , %	W_p , %	I_p , %	I_L	ϕ , град	c , МПа	E , МПа
Суглинок лесовой	Твердый	0,065	2,71	2,01	9,0	0,52	25	18	7	-1,28	23	0,035	5,0
		0,058	2,71	1,94	10,1	0,58	24	16	8	-0,74	23	0,034	4,8
		0,048	2,71	1,84	9,3	0,67	25	18	7	-1,24	23	0,032	4,8
	Полутвердый	0,030	2,71	1,64	12,9	0,82	24	17	7	-0,58	22	0,022	4,6
		0,024	2,71	1,58	15,2	0,87	24	17	7	-0,26	21	0,019	4,6
		0,032	2,71	1,96	17,1	0,63	24	16	8	0,14	22	0,031	4,5
Супесь лесовая	Тугопластичный	0,026	2,71	1,82	17,8	0,72	24	17	7	0,11	21	0,027	3,0
		0,029	2,71	1,98	19,0	0,62	24	17	7	0,29	22	0,030	3,3
		0,025	2,71	1,90	20,0	0,69	25	18	7	0,29	21	0,026	3,1
	Пластичная	0,020	2,71	1,82	20,2	0,78	24	17	7	0,46	21	0,023	2,8
		0,062	2,70	1,94	10,1	0,50	22	17	5	-1,38	24	0,026	5,0
		0,051	2,70	1,87	9,0	0,61	25	19	6	-1,67	24	0,023	4,8
Супесь лесовая	Твердая	0,042	2,70	1,72	14,8	0,70	22	17	5	-0,44	23	0,021	4,8
		0,036	2,70	1,70	12,4	0,76	24	18	6	-0,93	23	0,020	4,8
		0,027	2,70	1,60	15,2	0,85	25	19	6	-0,63	22	0,018	4,8
	Пластичная	0,049	2,70	1,92	16,2	0,60	22	16	6	0,03	23	0,020	3,5
		0,040	2,70	1,84	17,2	0,69	23	17	6	0,03	22	0,019	2,4
		0,035	2,70	1,79	16,8	0,74	22	16	6	0,13	21	0,016	2,4
		0,025	2,70	1,68	17,5	0,84	23	17	6	0,08	19	0,015	2,1

Примечание. Рассматриваемые типы грунта относятся к классу озерно-аллювиальных верхнеплиоценовых вертикальных отложений.

подтверждено микроструктурными исследованиями. Стоит отметить, что при приложении нагрузки, равной структурной прочности грунта, существенных изменений структуры не происходит, а при дальнейшем увеличении структурные связи ослабевают вплоть до разрушения.

На основании исследований [1] рекомендовано нижнюю границу сжимаемой толщи грунтового основания, сложенного лессовыми грунтами, определять из условия равенства величин напряжений от дополнительной нагрузки и структурной прочности грунта. В этом случае при определении активной зоны сжатия основания учитываются реальные свойства грунтов и процессы, происходящие в грунтовых основаниях при их нагружении, что позволяет точнее определять зависимости между нагрузками, передаваемыми на грунтовые основания, и их деформациями. Активная зона сжатия основания фундаментов, определенная из условия равенства значения напряжений от дополнительной нагрузки и величины структурной прочности грунта, получается до 20 % меньше по сравнению с рассчитанной по традиционной методике. Расчеты осадок различных вариантов фундаментов на основаниях, сложенных лессовыми грунтами с различными физико-механическими характеристиками, показали, что учет уменьшения активной зоны сжатия при одинаковых исходных данных приводит к снижению расчетной осадки (до 40 % для оснований с модулем деформации меньше 5 МПа).

Для практического применения составлена региональная инженерно-геологическая классификация лессовых грунтов Приобского плато, включающая значения структурной прочности (табл. 1) [1]. Классификация может быть рекомендована для расчетов грунтовых оснований зданий и сооружений пониженного уровня ответственности.

Многочисленные исследования указывают на то, что в расчетах оснований фундаментов необходимо учитывать анизотропные свойства, которыми обладает большинство грунтов. Профессором О.А. Коробовой проведен большой объем экспериментальных и расчетно-теоретических исследований напряженного состояния и деформируемости грунтовых оснований, сложенных лессовыми грунтами. Экспериментально установлено, что лессовые грунты обладают деформационной анизотропией с показателем анизотропии $\alpha = E_z / E_x$ в диапазоне 0,5...2,1 (E_z , E_x — модули деформации среды в вертикальном и горизонтальном направлениях соответственно). Выявлено заметное влияние начальной деформационной анизотропии среды на величину прогнозируемых осадок фундаментов (5–40 %) даже при сравнительно слабо выраженной анизотропии обычных природных грунтов. Разработан практический метод корректировки размеров подошвы фундамента с учетом деформационной анизотропии грунтов. Для расчета осадок грунтовых оснований предложен усовершенствованный метод послойного суммирования деформаций [2]. Предложение заключается в учете деформируемости грунта по вертикальному и горизонтальному направлениям при действии вертикальных $\sigma_{zp,a}$ и горизонтальных $\sigma_{xp,a}$ дополнительных напряжений, рассчитанных для точек полуплоскости, которые расположены на центральной вертикали посередине слоев h_i , предусмотренных СНиП 2.02.01–83*:

$$S = \sum \varepsilon_{z,i} h_i,$$

где

$$\varepsilon_{z,i} = \left(\frac{\sigma_{zp,i,a}}{E_z} \right) (1 - v_{xy} v_{zy}) - \left(\frac{\sigma_{xp,i,a}}{E_x} \right) (1 - v_{xy}).$$

Дополнительные напряжения вычисляются по зависимостям

$$\sigma_{zp,i,\alpha} = \sigma_{zp,i} K_\alpha, \quad \sigma_{xp,i,\alpha} = \sigma_{xp,i} K'_\alpha,$$

$$\sigma_{zp,i,\alpha}^y = \sigma_{zp,i}^y K_\alpha^y, \quad \sigma_{xp,i,\alpha}^y = \sigma_{xp,i}^y K'_\alpha^y,$$

где σ_{zp} (σ_{zp}^y) и σ_{xp} (σ_{xp}^y) — напряжения в соответствующих точках изотропной полуплоскости, определяемые по имеющимся решениям линейно-деформируемой среды для центральной и угловой вертикалей; K_α (K_α^y) и K'_α (K'_α^y) — поправочные коэффициенты влияния анизотропии грунта для характерных точек центральной и угловой вертикалей.

Влияние анизотропии на величину прогнозируемых осадок фундаментов более велико для грунтов, имеющих слоистую или столбчатую структуру при $\alpha > 1$. В этом случае расчет осадок по СНиП 2.02.01–83* без учета анизотропии приводит к заниженным значениям осадок, а для грунтов с показателем анизотропии $\alpha < 1$ — к завышенным значениям.

Практический интерес представляют исследования изменений свойств лессовых грунтов в основаниях длительно эксплуатируемых зданий (доц. И.А. Корнеев). Экспериментальными исследованиями физико-механических характеристик образцов лессовых грунтов, отобранных в основаниях зданий после различных сроков эксплуатации (10, 15, 20, 30, 40 лет), а также в результате их микроструктурного анализа установлено, что в основаниях зданий после 20 лет эксплуатации значительно возрастает структурная прочность и величина ее находится в пределах 0,090...0,094 МПа. При больших сроках эксплуатации (30 и 40 лет) существенных изменений этих величин не выявлено. Этот факт дает право предположить, что в грунтах оснований со сроком эксплуатации около 20 лет завершился процесс интенсивного структурообразования и происходит формирование новой, более прочной структуры грунта, а при сроках эксплуатации до 15 лет этот процесс еще не завершился. Установлено также, что по достижении определенного срока эксплуатации (более 15 лет) просадочные грунты оснований естественной влажности становятся непросадочными [3].

Очевидно, что изменение структуры грунтов в основаниях зданий происходит не только за счет их уплотнения под действием внешних нагрузок, но и за счет более сложных внутренних процессов, протекающих в грунтах. Влияние внутренних процессов в лессовых грунтах на изменение их структуры оценивалось в результате опытов по определению прочности индивидуальных контактов между частицами грунта в основаниях под подошвой фундаментов (нагруженная зона) и в ненагруженной зоне при различных сроках эксплуатации, а также при исследовании химико-минералогического состава поровой воды этих грунтов. Данные, приведенные в табл. 2, наглядно подтверждают формирование новой, более прочной структуры грунта при 20-летних сроках эксплуатации зданий. Основной причиной формирования новой структуры лессового грунта в основаниях длительно эксплуатируемых зданий является процесс старения — синерезис (исследования проф. И.М. Горьковой, НИИОСП им. Н.М. Герсанова). Этот процесс обусловлен действием молекулярных сил притяжения между частицами и заключается в увеличении прочности сцепления частиц лессовых грунтов в результате утончения прослоев дисперсионной среды в местах их контакта и уменьшения общего объема структурной системы. За счет

Таблица 2
Прочность индивидуальных контактов частиц лессовых грунтов зданий при различных сроках эксплуатации

Срок эксплуатации зданий, лет	Характеристика образца	Прочность структуры на разрыв p_c (грунтовые балочки), МПа	Определение прочности индивидуального контакта, p_i	
			число контактов, 1/см ²	средняя прочность индивидуального контакта, Н
—	Грунт в естественном состоянии	0,0450	$196 \cdot 10^5$	$0,229 \cdot 10^{-8}$
10	Грунт из-под подошвы фундаментов	0,0454	$185 \cdot 10^5$	$0,245 \cdot 10^{-8}$
15	То же	0,0470	$147 \cdot 10^5$	$0,320 \cdot 10^{-8}$
20	»	0,0620	$101 \cdot 10^5$	$0,615 \cdot 10^{-8}$
30	»	0,0609	$105 \cdot 10^5$	$0,580 \cdot 10^{-8}$
40	»	0,0600	$95 \cdot 10^5$	$0,630 \cdot 10^{-8}$

увеличения площади контактов частиц происходит увеличение прочности структуры.

Изменение прочности индивидуальных контактов частиц грунта непосредственно связано с изменением химико-минералогического состава поровой воды в грунте. Результаты исследования водных вытяжек из грунтов оснований длительно эксплуатируемых зданий в ненагруженных и нагруженных (под фундаментами) зонах приведены в табл. 3 (опыты И.А. Корнеева, В.Н. Лебзака). Как видно, под влиянием длительного давления от внешней нагрузки в массиве грунта наблюдается увеличение концентрации ионов кальция (на 30 %) и уменьшение концентрации ионов натрия (на 20 %). Миграция ионов кальция и натрия приводит к увеличению прочности индивидуальных контактов между частицами и, как следствие, к увеличению структурной прочности грунта и уменьшению его деформируемости.

Таблица 3
Результаты химического анализа водной вытяжки из грунтов

Показатель	Единицы измерения	Супесь		Суглинок	
		ненагруженная зона	нагруженная зона	ненагруженная зона	нагруженная зона
Водородный показатель	ед. pH	$7,38 \pm 0,42$	$7,22 \pm 0,41$	$7,89 \pm 0,45$	$7,74 \pm 0,44$
Гидрокарбонаты	мг / дм ³	$112 \pm 2,86$	$117 \pm 2,88$	$179 \pm 3,2$	$159 \pm 3,1$
Жесткость общая	ОЖ	$1,0 \pm 0,15$	$1,32 \pm 0,07$	$2,14 \pm 0,11$	$2,06 \pm 0,10$
Кальций	мг / дм ³	$14,2 \pm 0,71$	$20,4 \pm 1,02$	$22,8 \pm 1,14$	$24,0 \pm 1,20$
Магний	мг / дм ³	$3,53 \pm 0,18$	$3,65 \pm 0,18$	$12,2 \pm 0,61$	$10,5 \pm 0,52$
Калий	мг / дм ³	$1,9 \pm 0,2$	$1 \pm 0,2$	$1 \pm 0,2$	$1 \pm 0,2$
Натрий	мг / дм ³	$26,01 \pm 3,9$	$21,0 \pm 3,1$	$30,0 \pm 4,5$	$24,0 \pm 3,6$
Нитрат-ион	мг / дм ³	$0,90 \pm 0,16$	$0,41 \pm 0,07$	$3,16 \pm 0,38$	$4,25 \pm 0,51$
Нитрит-ион	мг / дм ³	$0,11 \pm 0,01$	$< 0,02$	$0,20 \pm 0,02$	$0,31 \pm 0,02$
Аммиак и ионы аммония	мг / дм ³	$< 0,05$	$< 0,05$	$0,11 \pm 0,04$	$< 0,05$
Сульфат-ион	мг / дм ³	$5,06 \pm 0,71$	$4,21 \pm 0,80$	$5,17 \pm 0,72$	$6,36 \pm 0,86$
Хлорид-ион	мг / дм ³	$< 10,0$	$< 10,0$	$< 10,0$	$< 10,0$
Железо общее	мг / дм ³	$26,0 \pm 3,9$	$< 0,04$	$< 0,04$	$< 0,05$

По результатам исследований [3] сделан вывод, что при определенном сроке эксплуатации зданий (около 20 лет), расположенных на лессовых основаниях, формируется более прочное основание, позволяющее значительно (до 40 %) увеличить нагрузку на существующие фундаменты без их усиления. Для территории г. Барнаула установлены зависимости изменения прочностных и деформационных характеристик лессовых супесей от сроков эксплуатации зданий. Благодаря прогнозированию изменения свойств грунтов в основании зданий можно значительно уменьшить объем дорогостоящих повторных инженерно-геологических изысканий и выполнить реконструкцию, в том числе с увеличением этажности зданий и сооружений без усиления существующих фундаментов, что даст существенный экономический эффект.

Выводы. 1. Учет структурных характеристик грунтов при оценке их сжимаемости позволяет более точно определить глубину сжимаемой зоны, как правило, уменьшить ее и более точно определить величину осадки основания.

2. В основаниях длительно эксплуатируемых зданий формируется новая, более плотная и прочная структура грунта, позволяющая увеличивать нагрузку на существующие фундаменты (в отдельных случаях до 40 %) и надстраивать здания без усиления фундаментов.

3. Целесообразна разработка новой механической модели работы лессового грунта, учитывающей его макро- и микроструктуру, прочность индивидуальных контактов между частицами грунта, их трансформацию под действием внешних нагрузок, а также анизотропные и фильтрационные свойства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Осипова, М.А. Комплексные исследования структурной прочности лессовых грунтов Приобского плато : автореф. дис. ... канд. геолого-минер. наук [Текст] / М.А. Осипова ; Алтайский гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. — Барнаул, 2007. — 21 с.
2. Коробова, О.А. Комплексные исследования напряженного состояния и деформируемости анизотропных грунтовых оснований : автореф. дис. ... д-ра техн. наук [Текст] / О.А. Коробова ; Алтайский гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. — Барнаул, 2002. — 37 с.
3. Корнеев, И.А. Комплексные исследования изменений свойств лессовых грунтов в основаниях длительно эксплуатируемых зданий : автореф. дис. ... канд. техн. наук [Текст] / И.А. Корнеев ; Алтайский гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. — Барнаул, 2001. — 24 с.

*ШВЕЦОВ Г.И., д-р геол.-минер. наук, проф., чл.-корр. РААСН
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул
ХАЛТУРИНА Л.В., канд. техн. наук, доц.; E-mail: khalt.larisa@mail.ru
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул*

Получено 29.11.10

Shvetsov G.I., doctor of geological and mineralogical sciences, professor, corresponding member of RAACS, Altai State Technical University after I.I. Polzunov, Barnaul, Russia

Khalturina L.V., candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: khalt.larisa@mail.ru, Altai State Technical University after I.I. Polzunov, Barnaul, Russia

STRUCTURAL-PHASE DEFORMABILITY OF LOESS SOILS UNDER NATURAL CONDITIONS AND IN THE FOUNDATIONS OF BUILDINGS AND STRUCTURES

Research results of loess soils structural strength, strain anisotropy, changes of their properties under the influence of external loads and other factors including consideration of long-used buildings are generalized. The main guidelines for practical application of these results for basement analysis are submitted.

Key words: loess soils, basements, deformability, structural strength, strain anisotropy.

REFERENCES

1. Osipova, M.A. Comprehensive researches of structural strength of Priobskiy plateau loess soils : abstract of a thesis ... candidate of geological and mineralogical sciences [Text] / M.A. Osipova ; Altai State Technical University after I.I. Polzunov. — Barnaul, 2007. — 21 p.
 2. Korobova, O.A. Comprehensive researches of stressed state and deformability of anisotropic basements : abstract of a thesis ... doctor of technical sciences [Text] / O.A. Korobova ; Altai State Technical University after I.I. Polzunov. — Barnaul, 2002. — 37 p.
 3. Korneev, I.A. Comprehensive researches of loess soils properties changes of long-used buildings basements : abstract of a thesis ... candidate of technical sciences [Text] / I.A. Korneev ; Altai State Technical University after I.I. Polzunov. — Barnaul, 2001. — 24 p.
-

УДК 624.072.014.2

В.П. ЮЗИКОВ, О.Б. ЗАВЬЯЛОВА

РАСЧЕТ ТОНКОСТЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ С УЧЕТОМ СДВИГА СРЕДИННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Предложена методика учета сдвига срединной поверхности при расчете тонкостенных стержней открытого профиля. Получены дифференциальные уравнения изгиба и кручения, а также матрица жесткости.

Ключевые слова: тонкостенный стержень, изгиб с кручением, сдвиг, матрица жесткости.

Теория тонкостенных стержней открытого профиля в наиболее общей и законченной форме обвязана работе В.З. Власова [1], где принимается гипотеза об отсутствии сдвигов в срединной поверхности тонкостенного стержня. В дальнейшем появились работы, авторы которых с различных позиций учитывают влияние деформаций сдвига на работу тонкостенного стержня. Сошлемся на ряд публикаций Л.И. Воробьева [2], В.Б. Мещерякова [3], П.И. Семенова [4].

Следуя работе Л.И. Воробьева [2], учет влияния деформации сдвига произведем, включив в выражение для энергии деформации тонкостенного стержня ту ее часть, которая вызвана работой касательных напряжений. Нормальные и касательные напряжения в точке A тонкостенного стержня будем определять по следующим формулам:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x} y - \frac{M_y}{I_y} x - \frac{B}{I_\omega} \omega; \quad (1)$$

$$\tau = \frac{2H}{I_d} h - \frac{Q_x S_y}{I_y \delta} - \frac{Q_y S_x}{I_x \delta} - \frac{M_\omega S_\omega}{I_\omega \delta}. \quad (2)$$

Здесь h — расстояние от точки A до срединной поверхности стержня.

В формулах (1) и (2) сохранены обозначения и правила знаков, принятые В.З. Власовым. Полный крутящий момент L будем определять как сумму

$$L = H + M_\omega. \quad (3)$$

Крутящий момент H , возникающий из-за неравномерного распределения касательных напряжений по толщине стенок, выражается через угол закручивания Θ формулой

$$H = G I_d \frac{d\Theta}{dz}. \quad (4)$$

Потенциальная энергия внутренних сил выражается через напряжения σ и τ равенством

$$V = \int_0^l \int_A \frac{\sigma^2}{2E} dA dz + \int_0^l \int_A \frac{\tau^2}{2G} dA dz.$$

Подставляя σ и τ в формулу потенциальной энергии, после преобразований имеем

$$V = \int_0^l \left(\frac{N^2}{2EA} + \frac{M_y^2}{2EI_y} + \frac{M_x^2}{2EI_x} + \frac{B^2}{2EI_\omega} + \frac{H^2}{2GI_d} \right) dz + \\ + \frac{1}{GA} \int_0^l \left(\frac{K_{xx}Q_y^2}{2} + \frac{K_{yy}Q_x^2}{2} + \frac{K_{\omega\omega}M_\omega^2}{2} + K_{xy}Q_xQ_y + K_{x\omega}Q_xM_\omega + K_{y\omega}Q_yM_\omega \right) dz. \quad (5)$$

При выводе первой строки формулы (5) использовались следующие равенства:

$$\begin{aligned} \int_A xydA &= \int_A x\omega dA = \int_A y\omega dA = \int_A xdA = \int_A ydA = 0, \\ \int_A y^2 dA &= I_x, \quad \int_A x^2 dA = I_y, \quad \int_A \omega^2 dA = I_\omega, \\ \int_A h^2 dA &= \int_0^S \left(\int_{-\delta/2}^{\delta/2} h^2 d_h \right) dS = \frac{1}{4} \int_0^S \frac{\delta^3}{3} = \frac{1}{4} I_d. \end{aligned}$$

При получении второй строки выражения (5) принималось во внимание, что в формуле (2) первое слагаемое — кососимметричные напряжения чистого кручения, а три последних слагаемых представляют собой постоянные по толщине профиля касательные напряжения. Поэтому произведение первого слагаемого на любое другое в формуле (2) обращается в нуль при интегрировании по площади поперечного сечения.

Геометрические характеристики поперечного сечения стержня K_{xx} , K_{yy} , ..., $K_{\omega\omega}$, входящие в (5), равны:

$$K_{ij} = \frac{A}{I_i I_j} \int_A \frac{S_{i(s)} S_{j(s)}}{\delta^2} dA, \quad i, j = x, y, \omega. \quad (6)$$

Для симметричных профилей некоторые из коэффициентов K_{ij} обнуляются. Например, $K_{xy} = K_{y\omega} = 0$, если сечение симметрично относительно оси x ; $K_{xy} = K_{x\omega} = 0$, если осью симметрии является ось y ; если же сечение симметрично относительно обеих главных осей, то $K_{xy} = K_{x\omega} = K_{y\omega} = 0$.

Пусть ξ , η , ζ — перемещения точек линии центров изгиба в направлении осей x , y и z . Учитывая известные зависимости $EA\zeta' = N$, $EI_x\eta'' = -M_x$, $EI_y\xi'' = M_y$, $-EI_x\eta''' = Q_y$, $-EI_y\xi''' = Q_x$, $-EI_\omega\Theta''' = M_\omega$, $-EI_\omega\Theta'' = B$ и подставляя их в (5), имеем

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{2} \int_0^l \{ EA(\zeta')^2 + EI_y(\xi'')^2 + EI_x(\eta'')^2 + EI_\omega(\Theta'')^2 + GI_d(\Theta')^2 \} dz + \\ &+ \frac{1}{2GA} \int_0^l \{ K_{yy}(EI_y\xi'')^2 + K_{xx}(EI_x\eta'')^2 + K_{\omega\omega}(EI_\omega\Theta'')^2 + \\ &+ 2K_{xy}EI_xEI_y\eta''\xi'' + 2K_{y\omega}EI_yEI_\omega\eta''\Theta'' + 2K_{x\omega}EI_xEI_\omega\eta''\Theta'' \} dz. \quad (7) \end{aligned}$$

Получим дифференциальные уравнения изгиба и кручения тонкостенного стержня открытого профиля с учетом сдвига срединной поверхности. Пусть на стержень действует распределенная нагрузка $q_x(z)$,

$q_y(z)$, $q_z(z)$, не изменяющая своего направления в процессе деформирования стержня. Тогда работа внешних сил будет

$$U = \int_0^l (q_x \xi + q_y \eta + q_z \zeta) dz. \quad (8)$$

Функционал полной энергии можно записать в виде

$$\Pi = V - U = \int_0^l \Phi(\zeta, \zeta', \xi, \xi', \xi'', \xi''', \eta, \eta', \eta'', \eta''', \Theta', \Theta'', \Theta''') dz.$$

Из условия экстремума функционала полной энергии системы выводим уравнения изгиба и кручения в перемещениях:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial \xi} + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \xi''} \right)^{II} - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \xi'''} \right)^{III} &= 0, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \eta''} \right)^{II} - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \eta'''} \right)^{III} = 0, \\ - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \Theta'} \right)^I + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \Theta''} \right)^{II} - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \Theta'''} \right)^{III} &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Подставляя в (9) выражения (7) и (8), получим

$$\begin{aligned} EI_y \left(\xi + \frac{K_{y\omega} I_d}{A} \Theta \right)^{IV} &= q_x + \varphi_x'''(z), \\ EI_x \left(\eta + \frac{K_{x\omega} I_d}{A} \Theta \right)^{IV} &= q_y + \varphi_y'''(z), \\ EI_\omega \left(1 + \frac{K_{\omega\omega} I_d}{A} \right) \Theta^{IV} - GI_d \Theta'' &= m_z + \varphi_\omega'''(z), \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi_x(z) &= \frac{EI_y}{GA} (K_{yy} Q_x + K_{xy} Q_y + K_{y\omega} L), \\ \varphi_y(z) &= \frac{EI_x}{GA} (K_{xx} Q_y + K_{xy} Q_x + K_{x\omega} L), \\ \varphi_\omega(z) &= \frac{EI_\omega}{GA} (K_{y\omega} Q_x + K_{x\omega} Q_y + K_{\omega\omega} L). \end{aligned}$$

Полагая в уравнениях (10) K_{xx} , K_{yy} , K_{xy} , $K_{x\omega}$, $K_{y\omega}$ равными нулю, приходим к известным уравнениям без учета сдвига срединной поверхности. Из уравнений (10) следует, что задачи об изгибе и кручении стержней с учетом сдвига срединной поверхности являются связанными. Если в некоторых случаях задача о кручении может быть решена независимо от задачи об изгибе, то решение задачи об изгибе невозможно без решения задачи о кручении.

Получим матрицу жесткости тонкостенного стержня открытого профиля с учетом сдвига срединной поверхности. Стержень считаем элементом с четырнадцатью степенями свободы, которым отвечает вектор обобщенных координат (рис. 1):

$$\mathbf{g} = [\xi_h, \eta_h, \zeta_h, \Theta_{xh}, \Theta_{yh}, \Theta_{zh}, \Theta'_{zh}, \xi_k, \eta_k, \zeta_k, \Theta_{xk}, \Theta_{yk}, \Theta_{zk}, \Theta'_{zk}]^T, \quad (11)$$

где Θ'_{zh} , Θ'_{zk} определяют депланацию крайних сечений.

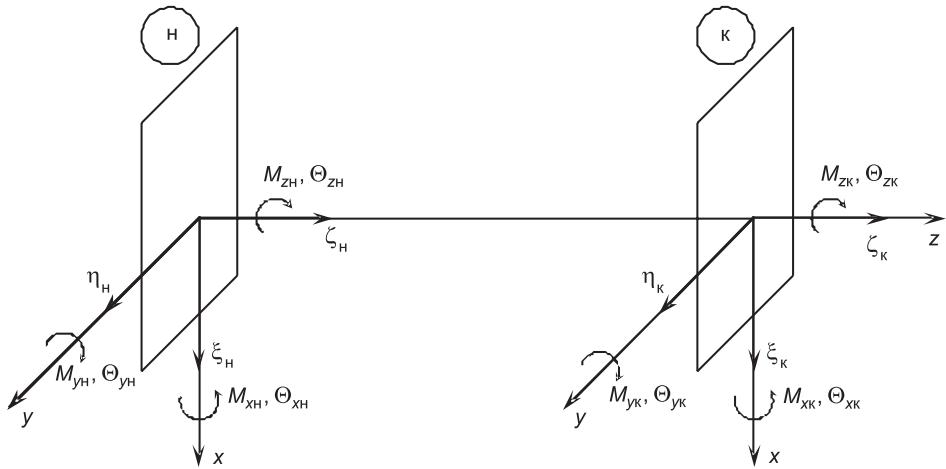


Рис. 1. Правило знаков для перемещений и внутренних сил, действующих по концам стержневого конечного элемента

При определении компонентов матрицы жесткости в первом приближении полагаем касательные напряжения равными нулю. В этом случае мы имеем известную матрицу жесткости тонкостенного стержня, которую не приводим. Произведя расчет конструкции в первом приближении, определяем внутренние усилия в стержнях.

При получении матрицы жесткости с учетом сдвига срединной поверхности ограничимся вторым приближением, когда касательные напряжения определяем по формуле (2), а потенциальную энергию деформации — по формуле (7).

В качестве компонентов перемещений примем следующие аппроксимирующие функции:

$$\begin{aligned}\xi(z) &= \sum g_s \psi_{s,y}(z), & s &= 1, 5, 8, 12, \\ \eta(z) &= \sum g_s \psi_{s,x}(z), & s &= 2, 4, 9, 11, \\ \zeta(z) &= \sum g_s \psi_s(z), & s &= 3, 10, \\ \Theta(z) &= \sum g_s \psi_{s,\omega}(z), & s &= 6, 7, 13, 14.\end{aligned}\quad (12)$$

Здесь g_s — узловое перемещение, соответствующее вектору (11);

$\psi_s(z)$ — аппроксимирующие функции.

Выбор аппроксимирующих функций — один из наиболее ответственных моментов в общей процедуре метода конечных элементов. Единственно надежным обоснованием в пользу того или иного закона аппроксимации является сопоставление полученного приближенного решения с точным или экспериментальным. Как показали расчеты, аппроксимирующие функции $\psi_{s,i}(z)$ необходимо назначать с учетом сдвига. Так, для стержня с двумя осями симметрии, жестко защемленного по концам, можно принять

$$\begin{aligned}\psi_{2,x}(z) &= \psi_{1,y}(z) = \psi_{6,\omega}(z) = 1 - 2 \frac{K_{ii}}{K_i l} \frac{EI_i}{GA} z - \frac{1}{4K_i} z^2 + \frac{1}{6K_i l} z^3, \\ -\psi_{4,x}(z) &= \psi_{5,y}(z) = -\psi_{7,\omega}(z) = \left(1 - \frac{K_{ii}}{K_i} \frac{EI_i}{2GA}\right) z - \left(1 + \frac{l^2}{4K_i}\right) \frac{z^2}{2l} + \frac{1}{12K_i} z^3,\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\psi_{9,x}(z) &= \psi_{8,y}(z) = \psi_{13,\omega}(z) = \frac{K_{ii}}{GA} \frac{EI_i}{K_i l} z + \frac{1}{4K_i} z^2 - \frac{1}{6K_i l} z^3, \\ \psi_{11,x}(z) &= -\psi_{12,y}(z) = \psi_{14,\omega}(z) = \frac{K_{ii}}{GA} \frac{EI_i}{2K_i} z + \left(\frac{l}{8K_i} - \frac{1}{2l} \right) z^2 - \frac{1}{12K_i} z^3,\end{aligned}\quad (13)$$

где $K_i = \frac{l^2}{12} + K_{ii} \frac{EI_i}{GA}$, $i = x, y, z$.

Если не учитывать сдвиг, то функции $\psi_s(z)$ принимают вид

$$\begin{aligned}\psi_3(z) &= 1 - z/l, \\ \psi_{10}(z) &= z/l, \\ \psi_1(z) &= \psi_2(z) = \psi_6(z) = 1 - 3z^2/l^2 + 2z^3/l^3, \\ \psi_5(z) &= -\psi_4(z) = -\psi_7(z) = z - 2z^2/l + z^3/l^2, \\ \psi_8(z) &= \psi_9(z) = \psi_{13}(z) = 3z^2/l^2 - 2z^3/l^3, \\ \psi_{12}(z) &= -\psi_{11}(z) = \psi_{14}(z) = -z^2/l + z^3/l^2.\end{aligned}\quad (14)$$

При выводе выражений (13) использовались результаты работы [4]. Функции $\psi_6(z)$, $\psi_7(z)$, $\psi_{13}(z)$, $\psi_{14}(z)$ являются приближенными. Для оценки приближенного решения сравним, например, значение коэффициента матрицы $r_{6,7}$, полученное с применением функций $\psi_6(z)$ и $\psi_7(z)$, с точным решением.

Точное решение, полученное на основе работы [4], вычисляется по формуле

$$r_{6,7} = \frac{GI_d(1 - ch\beta l)}{[(1 - ch\beta l)^2 + (\beta l - sh\beta l)sh\beta l] + K_{\omega\omega} \frac{I_d}{A} [sh^2\beta l - (1 - ch\beta l)^2]}, \quad (15)$$

$$\text{где } \beta = \sqrt{\frac{GI_d}{EI_{\omega}}}.$$

Приближенное решение, полученное нами, имеет вид

$$r_{6,7} = -\frac{2EI_{\omega}}{l^2} A_{\omega} - \frac{GI_k}{10}. \quad (16)$$

Вычислим $r_{6,7}$ для стержневого элемента длиной $l = 0,6$ м с поперечным сечением в виде широкополочного двутавра с размерами $b = h = 12$ см, $\delta_n = \delta_{cm} = 1$ см, у которого $A = 34$ см², $I_x = 809$ см⁴ (ось x параллельна полкам), $I_{\omega} = 8700$ см⁶, $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $GI_d = 10,9$ кНм². Предварительно по формуле (6) вычисляем $K_{xx} = 3,33$;

$$K_{\omega\omega} = 0,0562 \text{ см}^{-2} = 562 \text{ м}^{-2}.$$

Для рассматриваемого двутавра точное решение по выражению (15) дало $r_{6,7} = -28,13$ кНм, приближенное решение по (16): $r_{6,7} = -28,28$ кНм. Расхождение составило 0,53 %.

Матрица жесткости для пространственного тонкостенного стержня имеет порядок 14×14.

Чтобы построить элементы этой матрицы, воспользуемся вариационным принципом. Подставляя (12) в (7), выражение для потенциальной

энергии деформации квадратичной формой обобщенных перемещений g_s представим в виде двойной суммы

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{14} \left(\sum_{j=1}^{14} r_{ij} g_j \right) g_i. \quad (17)$$

Из (17) следует, что любой элемент матрицы жесткости $[R]$ можно получить как вторую производную от V :

$$r_{ij} = \frac{\partial^2 V}{\partial g_i \partial g_j}, \quad i, j = 1, 2, \dots, 14. \quad (18)$$

Определение элементов матрицы жесткости по формуле (18) позволило сформировать матрицу жесткости тонкостенного стержня открытого профиля в местной системе координат при пространственном деформировании с учетом сдвига срединной поверхности.

Приведем элементы матрицы жесткости $r_{ij} = r_{ji}$, учитывающие сдвиг срединной поверхности, которые определяем по формулам

$$\begin{aligned} r_{1,1} &= r_{8,8} = -r_{1,8} = \frac{4EI_y}{l^3} A_y, \quad r_{5,5} = r_{12,12} = \frac{EI_y}{l} (1 + A_y), \quad r_{5,12} = \frac{EI_y}{l} (A_y - 1), \\ r_{1,5} &= r_{1,12} = -r_{5,8} = -r_{8,12} = \frac{2EI_y}{l^2} A_y, \quad r_{3,3} = r_{10,10} = -r_{3,10} = \frac{EA}{l}, \\ r_{2,2} &= r_{9,9} = -r_{2,9} = \frac{4EI_x}{l^3} A_x, \quad r_{4,4} = r_{11,11} = \frac{EI_x}{l} (1 + A_x), \quad r_{4,11} = \frac{EI_x}{l} (A_x - 1), \\ r_{4,9} &= r_{9,14} = -r_{2,4} = -r_{2,11} = \frac{2EI_x}{l^2} A_x, \quad r_{6,6} = r_{13,13} = -r_{6,13} = \frac{4EI_\omega}{l^3} A_\omega + \frac{6GI_k}{5l}, \\ r_{7,14} &= \frac{EI_\omega}{l} (A_\omega - 1) - \frac{lGI_k}{30}, \quad r_{7,7} = r_{14,14} = \frac{EI_\omega}{l} (1 + A_\omega) + \frac{2lGI_k}{12}, \\ r_{7,13} &= r_{13,14} = -r_{6,7} = -r_{6,14} = \frac{2EI_\omega}{l^2} A_\omega + \frac{GI_k}{10}, \quad r_{1,2} = \frac{K_{xy} E^2 I_x I_y}{GA \cdot K_x K_y l}, \\ r_{1,6} &= \frac{K_{y\omega} E^2 I_y I_\omega}{GA \cdot K_y K_\omega l}, \quad r_{2,6} = \frac{K_{x\omega} E^2 I_x I_\omega}{GA \cdot K_x K_\omega l}, \\ r_{8,9} &= r_{1,2} = -r_{1,9} = -r_{2,8}, \quad r_{8,13} = r_{1,6} = -r_{1,13} = -r_{8,6}, \\ r_{1,4} &= r_{1,11} = r_{9,12} = -r_{2,12} = -r_{2,5} = -r_{4,8} = r_{5,9} = r_{8,11} = -r_{1,2} \frac{l}{2} \text{ и т. д.}, \end{aligned} \quad (19)$$

где

$$A_i = \frac{3}{1 + 12K_{ii}} \frac{EI_i}{l^2 GA}, \quad i = x, y, \omega.$$

С помощью представленной матрицы (19) были определены перемещения консольного стержня при плоском поперечном изгибе (рис. 2). Прогиб и угол поворота в символьном виде равны:

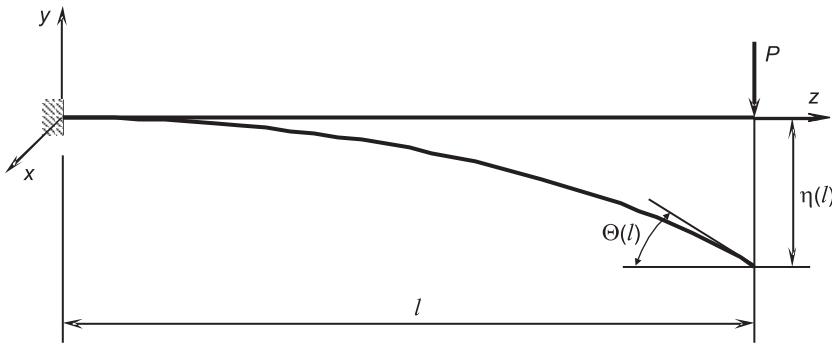


Рис. 2. Обозначение перемещений в консольном стержне

$$\eta(l) = -\frac{Pl^3}{4EI_x} \cdot \frac{(1+A_x)}{A_x}, \quad \Theta(l) = \frac{Pl^2}{2EI_x},$$

что совпало с известным решением, приведенным в работе [4]. Для рассмотренного ранее стержня двутаврового профиля (при $l = 0,6$ м) характеристика $A_x = 1,807$ и прогиб конца консоли равен

$$\eta(l) = -0,388 \frac{Pl^3}{EI_x}.$$

По сравнению с прогибом без учета деформаций сдвига прибавка составила 16,6 %.

Вывод. Полученные уравнения изгиба и кручения (10) позволяют производить расчет тонкостенного стержня открытого профиля с учетом влияния сдвига срединной поверхности, а матрица жесткости (19) легко встраивается в любой вычислительный комплекс, реализующий расчет пространственных рам по методу конечных элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Власов, В.З. Тонкостенные упругие стержни [Текст] / В.З. Власов. — М. : Физматгиз, 1959. — 566 с.
2. Воробьев, Л.Н. Влияние сдвига срединной поверхности на величину деформаций и напряжений в тонкостенных стержнях открытого профиля с недеформированным контуром [Текст] / Л.Н. Воробьев // Тр. Новочеркас. политехн. ин-та. — 1955. — Т. 26 (40).— С. 92–111.
3. Мещеряков, В.Б. Развитие теории тонкостенных стержней открытого профиля и ее практические приложения [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук. — М. : МИИЖТ, 1974. — 317 с.
4. Семенов, П.И. Расчет прочности и деформативности анизотропных тонкостенных стержней открытого профиля [Текст] / П.И. Семенов. — Киев : Вища школа, 1974. — 184 с.

ЮЗИКОВ В.П., канд. техн. наук, проф.
Астраханский инженерно-строительный институт
ЗАВЬЯЛОВА О.Б., инж.; E-mail: umotdel@aucu.ru
Астраханский инженерно-строительный институт

Получено после доработки 28.12.10

Yuzikov V.P., candidate of technical sciences, professor, Astrakhan Civil Engineering Institute, Russia

Zavjalova O.B., engineer; E-mail: umotdel@aucu.ru, Astrakhan Civil Engineering Institute, Russia

THE CALCULATION OF THIN-WALLED BARS OF OPEN PROFILE TAKING INTO ACCOUNT THE MIDDLE SURFACE SHIFT

The method of shift accounting of the middle surface in the calculation of thin-walled bars open section is offered. Differential equations of bending and torsion as well as stiffness matrix are found.

Key words: thin-walled bar, bending with torsion, shift, stiffness matrix.

REFERENCES

1. Vlasov, V.Z. Thin-walled elastic bars [Text] / V.Z. Vlasov. — M. : Fizmatgiz, 1959. — 566 p.
 2. Vorobyev, L.N. Shear effect of middle surface on the strains and stresses value in thin-walled bars open section with undeformed contour [Text] / L.N. Vorobyev // Works of Novocherkassk Polytechnic Institute. — 1955. — T. 26 (40). — P. 92–111.
 3. Mescheryakov, V.B. The development of the thin-walled bars open section theory and its practical applications : Doctorate thesis [Text] / V.B. Mescheryakov. — M : NIIGT, 1974. — 317 p.
 4. Semenov, P.I. Strength and deformability analysis of anisotropic thin-walled bars with open profile [Text] / P.I. Semenov. — Kiev : High School, 1974. — 184 p.
-

В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

УДК 624.072.012.4

М.А. ЛОГУНОВА, А.С. ПЕШКОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БЕТОННЫХ БАЛОК БЕЗ ОРГАНИЗОВАННЫХ ТРЕЩИН И С ЗАРАНЕЕ ОРГАНИЗОВАННЫМИ ТРЕЩИНАМИ

Изложены основные результаты экспериментальных исследований бетонных балок с организованными трещинами в растянутой зоне.

Ключевые слова: метод расчетных сечений, диаграммно-энергетический подход, организованные трещины, жесткость, трещиностойкость.

Проблеме образования трещин в теории железобетона посвящено немало специальных работ, однако процесс образования и развития трещин для железобетона рассматривался односторонне — раннее трещинообразование считалось одним из основных недостатков материала в конструкциях.

Балка, в которой образовалась трещина, имеет меньшую жесткость по сравнению с первоначальной, поэтому условия равновесия нарушаются и под действием неизменившейся нагрузки увеличиваются перемещения.

На кафедре железобетонных конструкций НГАСУ (Сибстрин) уже достаточно длительный период изучается эта проблема. Одна из первых работ на тему оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) сечения с трещиной была опубликована в журнале «Известия вузов. Строительство и архитектура» в 1988 году [1]. За ней последовал цикл работ, положивших начало созданию энергетической теории сопротивления железобетона [2, 3].

Процесс образования трещины протекает с очень большой скоростью и его можно представить как мгновенный разрыв бетона растянутой зоны, сопровождающийся колебанием балки. В соответствии с гипотезой проф. В.М. Митасова [1] при образовании трещины часть энергии растянутого бетона в ее окрестности рассеивается, а обратимая часть воспринимается арматурой и нетреснувшей (работоспособной) частью сечения. Был проведен физический эксперимент на железобетонных балках с заранее организованными трещинами, который показал, что гипотеза о переходе обратимой энергии растянутого бетона на арматуру подтвердилась [4].

В железобетонных балках с намеченными трещинами развитие последних происходит без скачков, т.е. создается более плавный характер деформирования [4]. Проф. В.М. Митасовым сделано предположение, что данный эффект будет иметь место не только для железобетонных, но и для бетонных балок. С целью проверки этой гипотезы проведен модельный эксперимент, в ходе которого изготовили четыре серии бетонных балок, в каждой серии по три балки. Балки серии 1 изготовили без организованных трещин. Балки серии 2 изготовили с одной заранее организованной трещиной высотой $0,25h$ в середине пролета. Балки серии 3 изготовлены с тремя

© Логунова М.А., Пешков А.С., 2011

заранее организованными трещинами высотой $0,1h$. В серии 4 балки с тремя заранее организованными трещинами высотой $0,25h$ (рис. 1).

Размеры бетонных балок $1200 \times 70 \times 140$ мм, класс бетона В15. Организованные трещины образованы установкой мягкой алюминиевой пластины толщиной 0,5 мм. Опирание балок на опорах принято шарнирным. Статическую нагрузку прикладывали с помощью гидродомкрата ДГ-25. Измерение величины передаваемой силы проводили с помощью манометра гидродомкрата и динамометра с ценой деления 2 Н. Величина каждой ступени загружения составляла 40 Н.

Для регистрации прогибов балок использовали прогибомеры Аистова с ценой деления 0,01 мм. Осадки опор, деформации волокон растянутой и сжатой зон измеряли с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм. Нулевые отсчеты по приборам снимали непосредственно перед началом нагружения, последующие (рядовые) отсчеты — после каждой ступени. Схема расстановки приборов приведена на рис. 2, фотоснимок балки представлен на рис. 3.

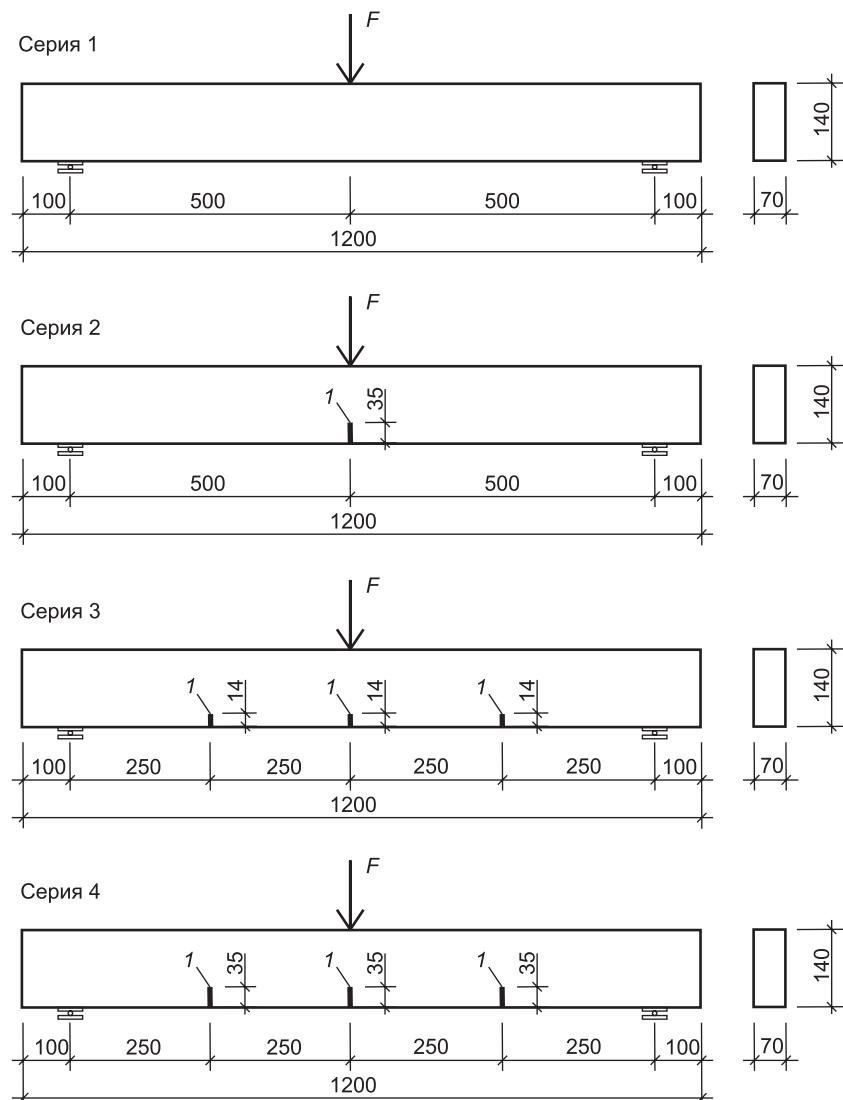


Рис. 1. Схемы балок серий 1–4 и приложения нагрузки
1 — организованная трещина

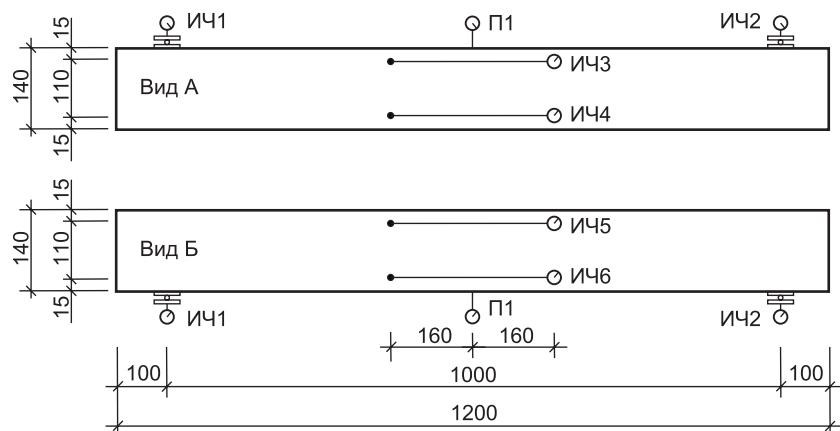


Рис. 2. Схема расположения индикаторов
ИЧ1–ИЧ6 — индикаторы часового типа с ценой деления 0,001 мм; П1 — прогибомер Аистова с ценой деления 0,01 мм

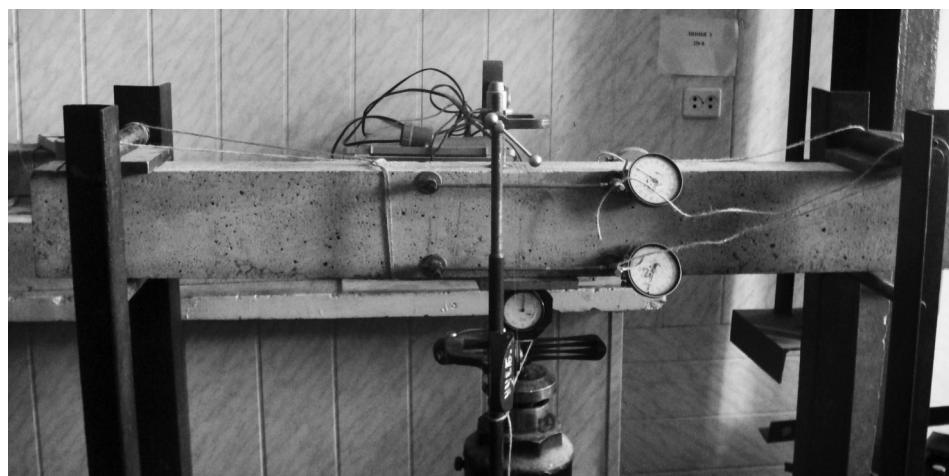


Рис. 3. Фотография балки перед испытанием

Разрушение бетонных балок всех серий произошло по нормальной трещине в середине пролета — в зоне действия максимального момента. Значения разрушающей силы для балок всех серий с учетом фактической прочности бетона, определенной по испытаниям стандартных кубов, получены одинаковыми, их разброс находится в пределах 5 %. Значения разрушающей нагрузки находятся в диапазоне 400...750 Н.

По результатам испытаний построены графики изменения прогибов и относительных регистрируемых деформаций наиболее сжатого и растянутого волокон в зависимости от нагрузки (рис. 4).

На этапах нагружения до 120 Н деформации развивались практически идентично. В диапазоне нагрузки 120...170 Н относительные регистрируемые деформации при сжатии и растяжении в балках с организованными трещинами были в 3–5 раз меньше, чем в балках без организованных трещин.

При нагрузках выше 200 Н в сжатой зоне у балок серии 1 происходит рост относительных регистрируемых деформаций по линейному закону до максимальной величины $4,5 \times 10^{-5}$, а в растянутой зоне — по нелинейному закону до максимальной величины $5,5 \times 10^{-5}$. В этом же диапазоне нагрузок для балок с организованными трещинами максимальные деформации в 3–5 раз ниже, чем у балок без намеченных трещин.

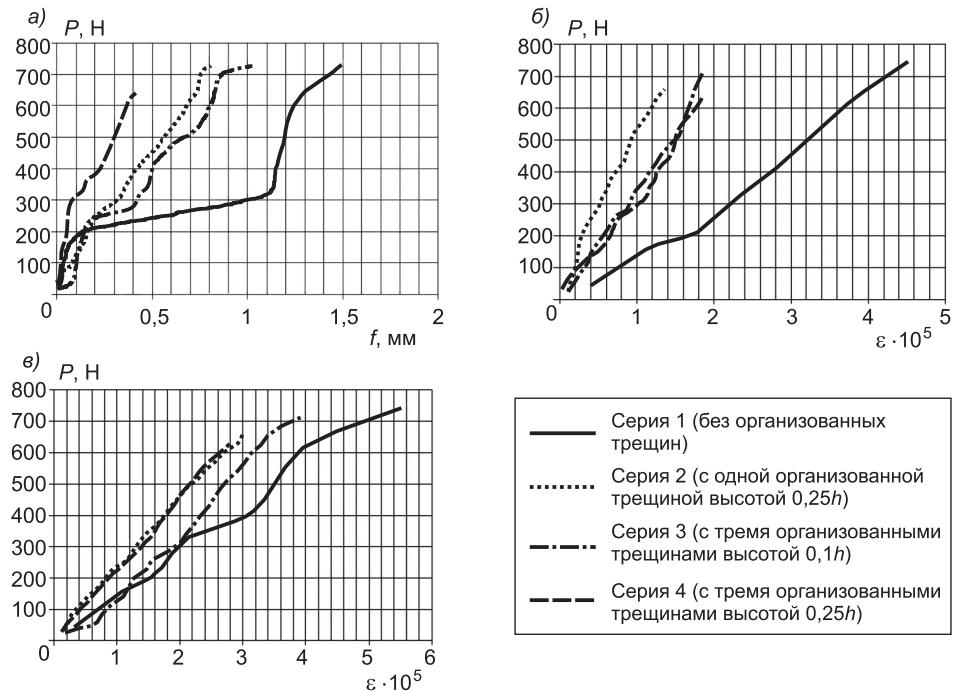


Рис. 4. Графики зависимости прогибов f (а) и деформаций ε бетонных балок четырех серий в сжатой (б) и растянутой (в) зонах от нагрузки P

Экспериментальные данные наглядно показывают, что кривая зависимости прогибов от нагрузки в бетонных балках без намеченных трещин (серия 1) имеет ярко выраженный участок резкого роста прогиба на 1 мм с увеличением нагрузки в диапазоне 180...320 Н, а в балках с намеченными трещинами этот прирост в 2–4 раза меньше (рис. 4).

Наличие участка с резким ростом деформаций на определенных этапах загружения говорит о процессе микротрецинообразования в растянутой зоне балки (о чем свидетельствовал и характерный звук «треска» на этих этапах), что, с одной стороны, приводит к увеличению деформаций растянутых волокон и соответственно увеличению прогиба балок, а с другой — к уплотнению бетона в сжатой зоне. В свою очередь, уплотнение сжатой зоны вызывает изменение деформационных свойств сжатых волокон бетона (упрочнение), пусть и незначительное, но достаточное для появления большего сдерживающего усилия в сжатой зоне, чем первоначально, что приводит к остановке дальнейшего роста прогиба.

В балках с организованными трещинами характер деформирования был другой, без резких «скачков» деформаций, что, похоже, обусловлено не стохастическим появлением в какой-то окрестности максимальных растягивающих усилий и таким образом «ослаблением» этой окрестности, а появлением в уже намеченной области, где микротрецины реализуются, в первую очередь затрагивая меньшую область растянутой зоны, а значит, и повреждая меньшее число растянутых волокон.

Выводы. 1. Бетонные балки с организованными трещинами обладают в 1,4–3,5 раза меньшим прогибом в отличие от балок со стохастически об разующимися трещинами при испытании в сопоставимых условиях.

2. Подтверждена гипотеза о том, что в бетонных балках с организованными трещинами создается более плавный характер деформирования, т.е. отсутствует (либо незначительна) «динамическая» составляющая деформаций.

3. С момента образования микротрещин жесткость балок с намеченными трещинами выше, чем в балках без них, а деформации регистрируемого наиболее сжатого волокна ниже.

4. Система регулирования трещинообразования способом моделирования нормальных трещин в зоне с максимальными моментами качественно меняет характер деформирования балок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Митасов, В.М. Определение напряжений арматуры железобетонного элемента в сечении с трещиной [Текст] / В.М. Митасов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1988. — № 3. — С. 116–118.
2. Митасов, В.М. Основные предпосылки построения энергетической теории сопротивления железобетона [Текст] / В.М. Митасов, В.В. Адищев // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 5. — С. 3–9.
3. Митасов, В.М. Основные положения энергетической теории сопротивления железобетона [Текст] / В.М. Митасов, В.В. Адищев // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 6. — С. 3–8.
4. Михайлова, Н.С. Экспериментальные исследования железобетонных балок без трещин и с заранее намеченной трещиной [Текст] / Н.С. Михайлова // Изв. вузов. Строительство. — 2007. — № 4. — С. 110–113.

ЛОГУНОВА М.А., асп.; E-mail: m-nblack@yandex.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

ПЕШКОВ А.С., асп.; E-mail: alex.1985@bk.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

Получено после доработки 26.12.10

Logunova M.A., post-graduate student; E-mail: m-nblack@yandex.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Peshkov A.S., post-graduate student; E-mail: alex.1985@bk.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

EXPERIMENTAL RESEARCH OF CONCRETE BEAMS WITHOUT CRACKS AND WITH SPECIFIED CRACKS

Main results of experimental research of concrete beams with made cracks in tension area are given in this article.

Key words: design cross-sections method, diagram-energy method, specified cracks, rigidity, crack-resistance.

REFERENCES

1. Mitasov, V.M. Determination of stress in reinforcement of reinforced concrete member in cross section with a crack [Text] / V.M. Mitasov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 1988. — N 3. — P. 116–118.
2. Mitasov, V.M. Main preconditions of creating energy theory of reinforced concrete strength [Text] / V.M. Mitasov, V.V. Adishchev // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 5. — P. 3–9.
3. Mitasov, V.M. Main regulations of energy theory of reinforced concrete strength [Text] / V.M. Mitasov, V.V. Adishchev // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 6. — P. 3–8.
4. Mikhailova, N.S. Experimental research of reinforced concrete beams without cracks and with specified crack [Text] / N.S. Mikhailova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2007. — N 4. — P. 110–113.

УДК 624.154.001.4

И.В. НОСКОВ, А.Ю. ХАЛТУРИН

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ ВИНТОВЫХ СВАЙ

Приведена методика испытаний винтовых свай «Криннер». Описана конструкция сборно-разборного испытательного стенда. Представлены результаты испытаний винтовых свай в различных грунтовых условиях.

Ключевые слова: винтовые сваи, полевые испытания.

Мировая история применения винтовых свай насчитывает уже около 200 лет. Опыт строительства выявил ряд преимуществ фундаментов из винтовых свай по сравнению с традиционными технологиями устройства свайных фундаментов. Высокая скорость монтажа фундаментных конструкций безударным погружением при помощи легкого компактного оборудования делает возможным проведение работ в непосредственной близости к существующим зданиям и коммуникациям, а также в стесненных условиях. Важна и экологическая составляющая — отсутствие земляных работ и простота полного демонтажа данного типа фундамента сводят к минимуму воздействие на окружающую среду при строительстве временных зданий и сооружений.

В то же время, по данным президента Международного общества по механике грунтов и геотехнике В.Ф. Ван Импе [1], в период 1997–2001 годы только 3 % всех использованных в строительстве свай были винтовыми. Сегодня широкому применению винтовых свай, особенно в гражданском строительстве, препятствует в первую очередь недостаточная изученность работы свай данных видов.

Наличие различных видов, конфигураций и размеров винтовых лопастей свай позволяет значительно варьировать характеристики устраиваемых фундаментов. На российском рынке фундаментостроения представлена продукция компании «KRINNER Schraubfundamente GmbH» (Германия). Винтовые сваи «Криннер» (рис. 1) представляют собой патентованный кованый конусный корпус из трубной заготовки с приваренной спиралью, они отличаются лопастями малых диаметров с большим количеством витков. Как следствие погружение таких свай можно производить малыми крутящими моментами. Защита от коррозии свай обеспечивается методом горячего цинкования.



Рис. 1. Винтовые сваи «Криннер»

Подобная конструкция свай «Криннер» не позволяет использовать существующую в российских нормативных документах (в частности, СНиП 2.02.03–85 «Свайные фундаменты») методику расчетов, которая в первую очередь предназначена для «классических» одновитковых винтовых свай. Широкое внедрение свай «Криннер» в практику строительства возможно при проведении экспериментальных и расчетно-теоретических исследований с учетом особенностей грунтов регионов. На территории города Барнаула такие исследования проводятся кафедрой «Основания, фундаменты, инженерная геология и геодезия» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова в рамках договора с официальным представителем компании «KRINNER Schraubfundamente GmbH» в России ООО «Криннер-Сибирь».

Контрольные испытания свай при строительстве статическими вдавливающими, выдергивающими и горизонтальными нагрузками регламентируются ГОСТ 5686–94 «Грунты. Методы полевых испытаний сваями» [2]. Данный стандарт не в полной мере отражает вопросы контрольных статических испытаний свай нагружением. Определение несущей способности свай по результатам полевых исследований регламентируют СНиП 2.02.03–85, а также СП 50-102–2003 «Проектирование и устройство свайных фундаментов» и его новая редакция СП 50-102–2010 «Свайные фундаменты» (в настоящее время в действие не введен). Программа испытаний свай «Криннер» была составлена в соответствии с указаниями действующих нормативных документов, а также с учетом имеющихся исследований [3].

Для проведения полевых испытаний свай был разработан испытательный стенд. Учитывая необходимость неоднократного монтажа и демонтажа, а также обеспечения возможности перевозки малотоннажными транспортными средствами, стенд было решено выполнить по схеме, принципиально отличающейся от предлагаемых [2]. Стенд представляет собой сборно-разборную металлическую стержневую конструкцию пирамидального типа с треугольным основанием, рассчитанную на нагрузку до 300 кН. Наклонные стойки и стержни основания выполнены из двух стержней, соединенных натяжными муфтами. При вращении натяжных муфт длина стержней может регулироваться в диапазоне нескольких десятков сантиметров, что обеспечивает точность совмещения фланцев анкерных свай и фланцев стендса, а также соосность приложения нагрузки на испытываемую сваю. Номинальные размеры сторон основания стендса составляют 2,05 м, расстояния от центра анкерных свай до центра испытуемой — 1,18 м.

ГОСТ [2] регламентирует расстояние от оси испытываемой натурной сваи до анкерной сваи, а также до опор реперной системы не менее $5d$ (d — диаметр сваи), но не менее 2 м для свай диаметром до 800 мм. При этом для винтовых свай расстояние между испытываемой и анкерной сваями в свету допускается уменьшать до $2d$. Очевидно, что для винтовых свай малого диаметра данные требования некорректны: при малых расстояниях сваи оказываются в зонах взаимного влияния. В стендсе, разработанном для испытания свай «Криннер», расстояния от центра анкерных свай до центра испытываемой сваи превышают $10d$.

Загружение свай осуществлялось с помощью гидравлического домкрата грузоподъемностью 30 тс. Гидравлический домкрат позволяет обеспечить плавность загружения и непрерывный контроль за нагрузкой по образцовому манометру. При испытании свай вдавливающими на-

Рис. 2. Испытательный стенд (вдавливающие нагрузки)

грузками (рис. 2) домкрат устанавливали непосредственно на испытуемую сваю. Упором домкрата в этом случае служила стойка трубчатой конструкции, соединенная шарнирно с упорной площадкой стенда. При испытании свай выдергивающими нагрузками (рис. 3) домкрат устанавливали на упорную площадку, усилие от домкрата передавалось через систему тяг, соединенных с испытываемой сваей.

Для измерения осадки опытной сваи применялись механические приборы: два индикатора часового типа ИЧ-50 (цена деления 0,01 мм) и один прогибомер Максимова ПМ-3 (цена деления 0,1 мм). Держатели приборов устанавливались на расстоянии 0,8 м от центра опытной сваи, что составляет не менее $7d$ сваи. Вертикальные перемещения анкерных свай контролировались с помощью индикаторов часового типа ИЧ-10-2М.

Программой работ на 2010 год предусматривалось проведение испытаний на трех опытных площадках с грунтовыми основаниями, сложенными супесями, песками и суглинками (расчетные характеристики грунтов приведены в таблице). Для испытаний выбраны сваи двух типоразмеров: длиной 2000 мм, диаметром 76 мм (KSF M24 76×2000) и длиной 2000 мм, переменным диаметром 76...114 мм (KSF M24 114×2000). На каждой площадке по три сваи каждого типоразмера испытывали на статические вдавливающие нагрузки и по две сваи — на статические выдергивающие нагрузки.

Нагружение опытных свай выполнялось ступенями, значение которых принималось не более $1/10$ от предполагаемой наибольшей нагрузки на сваю. Данные приборов снимались сразу после приложения

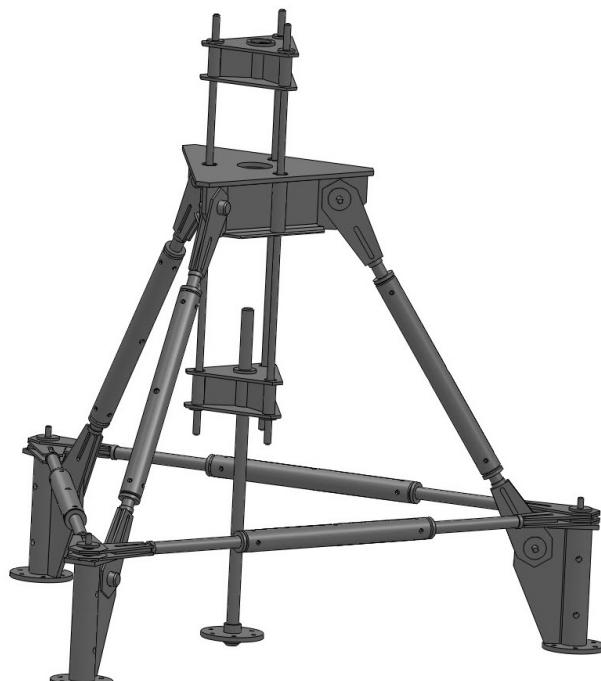
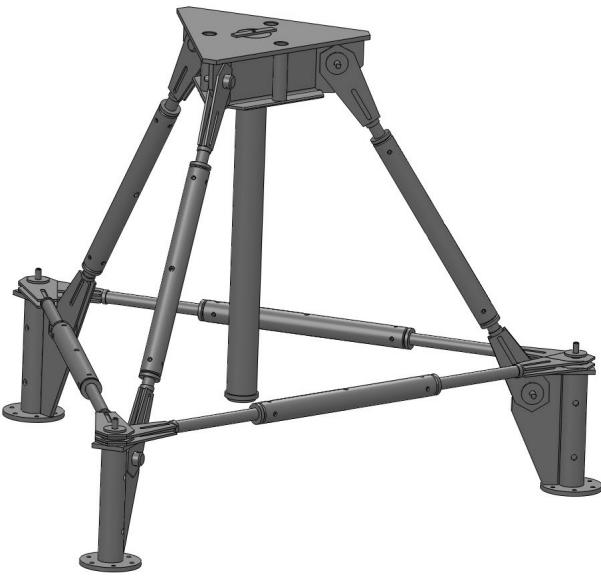


Рис. 3. Испытательный стенд (выдергивающие нагрузки)

Расчетные характеристики грунтов

№ пло- щадки	Наименование грунта	Удельный вес, кН / м ³	Угол внутреннего трения, град	Удельное сцепление, кПа	Модуль деформа- ции, МПа, при W / W_{sat}
1	Супесь лессовидная просадочная твердая	16,0	25	7	6 / 1,5
2	Песок мелкий средней плотности	16,6	32	2	26
3	Суглинок лессовидный просадочный высокопористый твердый сильносжимаемый	15,8	21	5	8,0 / 1,1

очередной ступени нагружения и далее с интервалом 15 мин вплоть до условной стабилизации деформаций. За критерий условной стабилизации деформации принята скорость осадки сваи (S) или выхода сваи из грунта (D_V) на данной ступени нагружения, не превышающая 0,1 мм за 1 ч наблюдения.

При проведении статических испытаний на вдавливание значение нагрузки доводили до величины, вызывающей осадку сваи не менее 40 мм, что соответствует требованиям ГОСТ [2]. В то же время в работе [4] отмечается, что максимальная нагрузка при испытании свай может определяться исходя из предельной осадки проектируемого здания, регламентируемой СНиП 2.02.01–83* «Основания зданий и сооружений».

Согласно СНиП 2.02.03–85 за частное значение предельного сопротивления F_u сваи при статическом испытании на вдавливание принимается нагрузка (при общей осадке не более 20 мм), вызывающая непрерывное возрастание осадки. Данное определение F_u не соответствует общей методике определения несущей способности свай по результатам полевых испытаний. Только в проекте СП 50-102–2010 уточняется, что за частное значение предельного сопротивления сваи принимается нагрузка, зарегистрированная при предыдущей степени загружения. Если общая осадка сваи превышает 20 мм, то за частное значение предельного сопротивления сваи принимается нагрузка, под воздействием которой свая получила осадку, равную 1/5 от предельного значения средней осадки фундамента проектируемого здания или сооружения, устанавливаемого по указаниям СНиП 2.02.01–83* (СП 50-101–2004). Предельное значение средней осадки фундамента в общем случае согласно СНиП 2.02.01–83* находится в пределах 8...40 см, согласно СП 50-101–2004 — в диапазоне 10...40 см. Таким образом, осадка свай, при которой по результатам статических испытаний определяется их предельное сопротивление с учетом указаний СНиП 2.02.03–85, составляет от 16 до 40 мм согласно СНиП 2.02.01–83* и от 20 до 40 мм согласно СП 50-101–2004. Исходя из этого при испытаниях за частное значение предельного сопротивления F_u сваи при статическом испытании на вдавливание принимались:

- при регистрации нагрузки, вызывающей непрерывное возрастание осадки при общей осадке до 20 мм, нагрузка, зарегистрированная при предыдущей степени загружения;
- во всех остальных случаях нагрузка, под воздействием которой испытываемая свая получит осадку, равную 20 мм.

При испытании свай статической выдергивающей нагрузкой за частное значение предельного сопротивления F_u принималась нагрузка на одну ступень менее нагрузки, при которой вертикальные перемещения сваи непрерывно возрастили.

Результаты испытаний представлены на графиках зависимости осадки и выхода свай от вертикальной нагрузки (рис. 4 и 5). Данные графики свидетельствуют о существенных отличиях в работе свай в различных грунтовых условиях. При испытании в твердых супесях до нагрузки $(0,6\ldots0,8)F_u$ деформации увеличиваются линейно при малой общей осадке свай, после чего образуется ярко выраженная зона сдвигов со значительным увеличением общей осадки (до 15 мм). При превышении F_u происходит незатухающее возрастание осадки свай. При испытании в песках мелких средней плотности деформации возрастают линейно до нагрузки $(0,4\ldots0,5)F_u$, осадка при работе свай в зоне сдвигов носит затухающий характер даже при общей осадке более 20 мм. При испытании в твердых суглинках до нагрузки $(0,6\ldots0,7)F_u$ деформации увеличиваются линейно при малой общей осадке свай; далее происходит резкое увеличение осадки, при этом рост осадки также носит линейный характер (до 10 мм). В случае превышения F_u происходит незатухающее возрастание осадки свай.

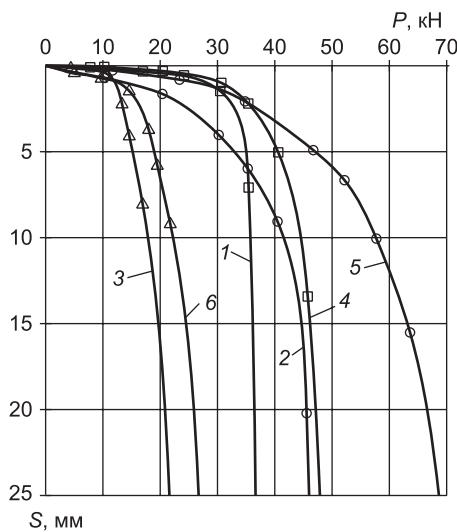


Рис. 4. Графики зависимости «нагрузка — осадка свай» $S = f(P)$

Кривые 1—3 — сваи KSF M24 76×2000 на площадках соответственно 1—3; кривые 4—6 — сваи KSF M24 114×2000 на площадках соответственно 1—3

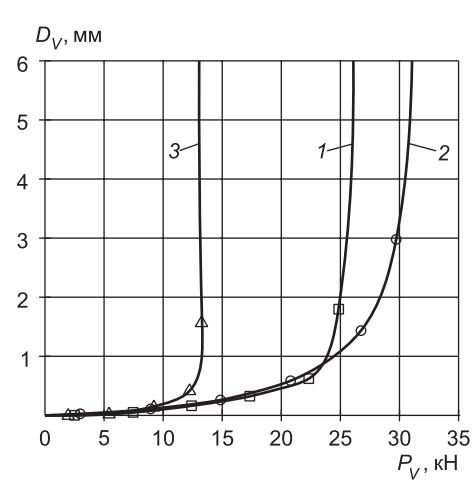


Рис. 5. Графики зависимости «нагрузка — выход свай из грунта» $D_V = f(P_V)$

Кривые 1—3 — площадки соответственно 1—3

При испытании выдергивающими нагрузками увеличение выхода свай из грунта на большей части нагружения для всех исследованных типов грунтов носит линейный характер. Общий выход свай из грунта до момента начала незатухающих деформаций не превышает 4 мм. Испытания на площадках 1 и 2 показали одинаковую работу свай обоих типоразмеров на выдергивающие нагрузки. На площадке 3 значения предельного сопротивления свай оказались различными. С учетом вышеизложенного на площадке 3 было решено провести дополнительные испытания на выдергивающие нагрузки свай, уже испытанных на вдавливающие нагрузки, после их «отдыха». Время «отдыха» свай перед испытанием выдергивающими нагрузками составило 12–14 дней при регламентированных ГОСТ [2] шести днях. Результаты испытаний показали снижение несущей способности свай почти в 2 раза относительно свай, испытанных только на выдергивающие нагрузки. Это указывает на тот факт, что данное допущение ГОСТ [2] не является корректным для всех типов грунтов.

В зимний период 2010 года программой испытаний предусмотрены испытания данных свай на воздействие сил морозного пучения. На основании уже имеющегося опыта использования данных свай, а также учитывая малую площадь соприкосновения свай с грунтом и наличие спирали, можно предположить, что они существенно менее подвержены влиянию сил морозного пучения в зоне промерзания грунтов, чем однолопастные винтовые, короткие забивные и набивные сваи.

Вывод. Винтовые сваи «Криннер» подтвердили свою эффективность в грунтовых условиях г. Барнаула. Методика действующего СНиП 2.02.03-85 «Свайные фундаменты» не применима для винтовых свай «Криннер», поскольку не учитывает их конструктивные особенности. Расчетная несущая способность, определенная по СНиП, оказывается меньше полученной по результатам полевых испытаний в два и более раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ван Импe, В.Ф. Фундаменты глубокого заложения: тенденции и перспективы развития [Текст] / В.Ф. Ван Импe // Реконструкция городов и геотехническое строительство. — 2005. — № 9. — С. 7–33.
2. ГОСТ 5686–94. Грунты. Методы полевых испытаний сваями [Текст]. — М. : ИПК Изд-во стандартов, 1996. — 51 с.
3. Железков, В.Н. Винтовые сваи в энергетических и других отраслях строительства [Текст] / В.Н. Железков. — СПб. : Изд. дом «Прагма», 2004. — 125 с.
4. Дзагов, А.М. О контрольных испытаниях свай статическими нагрузками и интерпретация их результатов [Текст] / А.М. Дзагов // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 2002. — № 6. — С. 18–19.

*НОСКОВ И.В., канд. техн. наук, доц.; E-mail: noskov.56@mail.ru
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул*

*ХАЛТУРИН А.Ю., асп.; E-mail: khalturin_alex@mail.ru
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г. Барнаул*

Получено 10.11.10

Noskov I.V., candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: noskov.56@mail.ru, Altai State Technical University after I.I. Polzunov, Barnaul, Russia

Khalturin A.Yu., post-graduate student; E-mail: khalturin_alex@mail.ru, Altai State Technical University after I.I. Polzunov, Barnaul, Russia

METHOD AND RESULTS OF FIELD TESTS OF SCREW PILES

Method of Krinner screw piles field tests is considered. Design of the demountable test bench is described. Field tests results of the screw piles in various soil conditions are submitted.

Key words: screw piles, field tests.

REFERENCES

1. Van Impe, W.F. Deep foundations: trends and prospects of development [Text] / W.F. Van Impe // Reconstruction of cities and geotechnical engineering. — 2005. — N 9. — P. 7–33.
2. GOST 5686–94. Soils. Field test methods by piles [Text]. — M.: IPK Publ. of guidelines, 1996. — 51 p.
3. Zhelezkov, V.N. Screw piles in energy and other sectors of engineering [Text] / V.N. Zhelezkov. — SPb. : Publ. «Pragma», 2004. — 125 p.
4. Dzagov, A.M. On the proof tests of piles by static load and interpretation of their results [Text] / A.M. Dzagov // Basements, foundations and soil mechanics. — 2002. — N 6. — P. 18–19.

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ¹

1. К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:

- *сопроводительное письмо* руководства организации, откуда исходит рукопись;

к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи² за подпись автора или руководителя представляющей статью организации. Плата за публикацию статей аспирантов не взимается. Гарантийное письмо не требуется, если статья представляется организацией, осуществляющей целевые взносы на издание нашего журнала;

- рекомендацию соответствующей кафедры вуза (заверенную выписку из протокола заседания кафедры);

- экспертное заключение о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись;

- разрешение Роспатента на открытую публикацию материалов по заявке на изобретение.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере в программе Microsoft Word и представляться в редакцию распечатанной в двух экземплярах, с приложением ее записи на CD (3", 5") или диске 3,5". Текст рукописи набирают шрифтом Times New Roman Суг размером 14 пт. с межстрочным интервалом 1,5. Объем рукописи — до 10 страниц. Обязательна нумерация страниц.

3. Порядок оформления статьи (см. макет статьи на Internet-сайте журнала):

- индекс УДК;

- инициалы, фамилии авторов;

- название статьи;

- аннотация (объемом до 0,3 страницы текста);

- ключевые слова;

- текст статьи;

- библиографический список не более четырех ссылок (при большем количестве их следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5–2008);

- сведения об авторах: *фамилии, инициалы, ученые степени, звания* (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и *английском языках*;

- почтовые адреса, телефоны и *e-mail* авторов;

- *название статьи на английском языке*;

- *аннотацию на английском языке*;

- *ключевые слова на английском языке*;

- *библиографический список на английском языке*.

4. На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

5. Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением *.cdr (предпочтительно) или *.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. Иллюстрации, в том числе фотографии, должны быть черно-белыми с хорошей проработкой деталей.

Рисунки должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (внести изменения, исправления, т.е. изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки).

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, с подписями к ним. Размер иллюстрации не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

6. Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

7. Формулы следует набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. *Русские и греческие буквы* и индексы, а также *цифры*, *аббревиатуры* и *стандартные функции* (Re, cos и др.) набираются *прямым шрифтом*. *Латинские буквы* набирать *курсивом*. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др.), а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *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).

¹ С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

² На 2011 г. — из расчета 650 р. за 1 журнальную страницу.

Индекс 70377

(Окончание правил)

8. Следует применять физические величины и их обозначения, соответствующие стандарту СТ. СЭВ 1052–78 (СН 528–80).

9. В библиографический список включаются только те работы, которые опубликованы в печати, составленные в соответствии с ГОСТ 7.80–2000, ГОСТ 7.1–03.

Примеры оформления можно найти на Internet-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу www.sibstrin.ru

10. Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции. Материалы уже публиковавшихся работ к рассмотрению не принимаются.

11. Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указываются ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка «рукопись после доработки». Доработанную статью необходимо 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 2011 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 — 1200 р.

Цена отдельного номера — 200 р.

Подписка принимается с любого месяца без ограничения всеми агентствами
Роспечати и отделениями связи. Индекс 70377.

ISSN 0536—1052. Известия вузов. Строительство. 2011. № 1 (625). 1–126

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 1 (625) 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*