

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

№ 4 (628)  
Апрель 2011 г.

Главный редактор В.Г. Себешев  
Редакционная коллегия: А.А. Афанасьев,  
В.Л. Баладинский, Т.И. Баранова, В.А. Воробьев,  
П.А. Дмитриев, В.А. Игнатьев, В.И. Костин (зам. гл.  
редактора), Г.Б. Лебедев (зам. гл. редактора),  
Е.М. Лобанов, Л.С. Ляхович, В.И. Морозов,  
Ю.П. Панибратов, Ю.П. Правдинец, В.Г. Себе-  
шев, И.Б. Соколов, Ю.А. Феофанов, Е.М. Чер-  
нышов

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:  
630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113.  
Тел./факс 266-28-59.  
[www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru) E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 05.05.11. Формат 70×108 1/16.  
Усл. печ. л. 11,03+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 289.

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

**Мищенко А.В., Немировский Ю.В.** Несущая способность слоистых стержней и рам при много-параметрическом динамическом воздействии.

Сообщение 2 ..... 3

### СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

**Бердов Г.И., Ильина Л.В., Сухаренко В.А.** Влияние совместного введения электролитов и минеральных добавок на прочность цементного камня на основе клинкера, хранившегося длительное время во влажных условиях .....

10

**Мардиросова И.В., Чан Н.Х., Балабанов О.А.** Модифицированное асфальтовое вяжущее повышенной стойкости к старению .....

15

**Клименко В.Г.** Активаторы твердения ангидрита на основе продуктов термообработки гипса .....

21

**Фокин Г.А., Фолимагина О.В.** Исследование влияния вихревидинамического поля на свойства воды затворения и гипсового теста .....

29

**Низина Т.А., Кисляков П.А., Зимин А.Н., Низин Д.Р.** «Критическая» микротвердость как критерий структурной неоднородности строительных материалов .....

36

<b>САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА</b>	
<b>Кривошеин А.Д.</b> Прогнозирование работы систем естественной вентиляции жилых зданий с организованным притоком воздуха .....	43
<b>СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ</b>	
<b>Столбов Ю.В., Нагаев Д.О., Столбова С.Ю.</b> Исследование точности высотного положения поверхности верхнего слоя покрытия автомобильных дорог .....	53
<b>СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ</b>	
<b>Пермяков В.Б., Семенов А.С.</b> Аналитическое обоснование оптимальных параметров и формы вырезаемой стружки грунта самоходными скреперами .....	61
<b>НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ</b>	
<b>Пустоветов Г.И., Лихачев Е.Н.</b> Современные тенденции экологизации объектов сельской среды .....	69
<b>НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ</b>	
<b>Виноградов А.Б., Виноградов С.А.</b> Определение скорости перемещения контакта при линейном касании взаимоогибаемых поверхностей .....	75
<b>Грузин А.В., Абраменков Э.А.</b> Обоснование и выбор оборудования для исследований взаимодействия штампов с грунтом .....	83
<b>Дегтярев В.В., Плетнев А.С., Зыков В.В.</b> Лабораторная установка и измерительный комплекс для исследования нестационарных водных потоков .....	93
<b>Демешкин А.Г., Роллов Р.А., Шваб А.А.</b> Исследование прочностных свойств базальтовых нитей применительно к производству неметаллической арматуры .....	99
<b>Криворотов А.П., Лубягин А.В., Бабелло В.А., Гришин Д.В.</b> К вопросу об использовании сложных нелинейных моделей грунта .....	106
<b>Макаров В.Г., Синельникова Р.М., Косилова Д.В., Кучеренко А.Г.</b> Расчет нестационарных температурных полей в стеклопластиковых футеровках .....	113
<b>ВНЕДРЕНИЕ НАУЧНЫХ ДОСТИЖЕНИЙ В ПРОИЗВОДСТВО</b>	
<b>Сухно А.М.</b> Разработка и внедрение автоматизированной системы дистанционного мониторинга на гидротехнических сооружениях в условиях Крайнего Севера ....	118
Памяти ученого, педагога .....	126

# ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 624.072.014.042.8

А.В. МИЩЕНКО, Ю.В. НЕМИРОВСКИЙ

## НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СЛОИСТЫХ СТЕРЖНЕЙ И РАМ ПРИ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОМ ДИНАМИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ\*

**Сообщение 2\*\***

На основе теории, изложенной в сообщении 1 [1], проведено численное исследование предельных по прочности и жесткости состояний слоистого стержня, нагруженного двумя гармоническими нагрузками.

**Ключевые слова:** слоистый стержень, динамические нагрузки, многопараметрическое нагружение, предельная нагрузка.

Согласно теории, изложенной в сообщении 1 [1], рассмотрим численное исследование предельных состояний стального трехслойного стержня постоянного двутаврового сечения (рис. 1), испытывающего воздействие двух динамических нагрузок  $F_x(t) = F_0 \sin \omega_1 t$ ,  $q_y(t) = q_0 \sin \omega_2 t$  при  $F_0 = 50 p_1$ ,  $q_0 = p_2 l^{-1}$ ,  $\omega_1 = 85 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_2 = 50 \text{ с}^{-1}$ . Нижняя полка и стенка двутавра изготовлены из стали марки С345, а верхняя полка — из С245. Требуется с использованием критерия прочности (15)<sup>1</sup> построить границу области допустимых состояний (17) при варьировании параметров  $p_1$ ,  $p_2$ , приняв для материалов  $R_1 = R_2 = 340 \text{ МПа}$ ,  $R_3 = 230 \text{ МПа}$ ,  $E = 205 \text{ ГПа}$ .

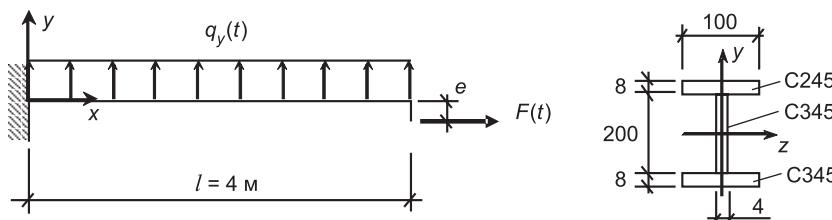


Рис. 1. Расчетная схема стержня и поперечного сечения

Для простоты расчет выполним без учета касательных напряжений, вязкости материалов и инерции вращательного движения. Совместив отсчетную поверхность с горизонтальной плоскостью симметрии стержня, из (6) при  $m_s = D_s = V_s = 0$  получим уравнения

$$D_A u'' - m_A \ddot{u} = -q_x(x, t), \quad D_I v^{IV} + m_A \ddot{v} = q_y(x, t). \quad (a)$$

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

\*\* Сообщение 1 в № 3 2011 г.

<sup>1</sup> Все числовые ссылки на формулы даны по источнику [1].

Для упрощения технической реализации вынужденное движение стержня будем считать происходящим по установившимся законам  $u(x, t) = U(x)\sin\omega_i t$ ,  $v(x, t) = V(x)\sin\omega_i t$ . Тогда из (а) при  $q_x = 0$  получим уравнения форм колебаний:

$$U'' + k_u^2 U = 0, \quad V^{IV} - k_v^4 V = q_0 / D_I, \quad k_u^2 = \omega_i^2 m_A / D_A, \quad k_v^4 = \omega_i^2 m_A / D_I. \quad (6)$$

Первое уравнение (6) при условиях  $U(0) = 0$ ,  $D_A U'(l) = F_0$  дает

$$U_F(x) = \frac{50p_1}{k_u D_A \cos k_u l} \sin k_u x, \quad k_u^2 = \omega_i^2 \frac{m_A}{D_A}.$$

Решение второго уравнения (б) получим с использованием функций Крылова  $K_j(x)$  ( $j = 1, \dots, 4$ ) [2]. При загружении стержня моментом  $M_z = F_0 e$  на правом конце после преобразований при условиях  $V(0) = V'(0) = V''(l) = 0$ ,  $D_I V''(l) = F_0 e$  получим прогиб

$$V_F(x) = V_{F_0} [(ch k_{v1} l + cos k_{v1} l) K_3(x) - (sh k_{v1} l - sin k_{v1} l) K_4(x)],$$

$$V_{F_0} = \frac{50p_1 e}{\xi_0 k_{v1}^2 D_I}, \quad \xi_0 = (1 + ch k_{v1} l \cos k_{v1} l), \quad k_{v1}^4 = \omega_i^2 \frac{m_A}{D_I}.$$

От действия поперечной нагрузки решение (б) принимает вид

$$V_q(x) = V_{q0} [K_1(x) + \xi_1 K_3(x) + \xi_2 K_4(x) - 1], \quad V_{q0} = \frac{p_2}{k_{v2}^4 l D_I}, \quad k_{v2}^4 = \omega_i^2 \frac{m_A}{D_I},$$

$$\xi_1 = \xi_0^{-1} sh k_{v2} l \sin k_{v2} l, \quad \xi_2 = -\xi_0^{-1} (ch k_{v2} l \sin k_{v2} l + sh k_{v2} l \cos k_{v2} l).$$

Окончательное выражение деформации получим как

$$\varepsilon(x, y, t, p_1, p_2) = U'_F(x, p_1) \sin \omega_i t - y [V'_F(x, p_1) \sin \omega_i t + V''_q(x, p_2) \sin \omega_2 t].$$

Численные расчеты предельных состояний выполнены методом фиксированных направлений  $\lambda$  [1] в двумерном пространстве параметров нагрузок  $P = [p_1, p_2]$  по следующему алгоритму:

- а) задание координат  $\chi_1, \chi_2$  вектора направления  $\lambda$  (21);
- б) выявление по пространству стержня множества предположительно опасных точек  $x_* = 0, l, y_* = y_1, y_3, y_4$ ;
- в) исследование процессов изменения во времени контролируемой величины  $\tilde{\varepsilon}_x(x_*, y_*, t)$  в назначенных точках с установлением для каждой из них по критерию максимума (23) критических моментов времени;
- г) выполнение по условию (23) окончательного отбора наиболее опасной точки среди назначенных точек;
- д) вычисление предельной амплитуды нагрузки (22) для опасной точки.

На двух последних шагах (г), (д) условие максимума контролируемой величины (23) может быть заменено эквивалентным условием минимума амплитуды предельной нагрузки.

Для иллюстрации результатов обратимся к направлению  $\lambda = (0,6; 0,8)$ . Значения предельной нагрузки и критического времени при различных эксцентрикитетах и координатах  $y = y_1, y_3, y_4$  приведены в таблице. На рис. 2 зависимости  $p^*(e, y)$  показаны в графическом виде. Предельная линия является огибающей снизу:  $p(e) = \min_y p(e, y)$  (для наглядности она

сдвинута вниз на 0,8 кН). На рис. 3 для некоторых значений эксцентрикитета приведены распределения деформаций  $\varepsilon(y)$ , возникающих в опасном сечении  $x_* = 0$  в критические моменты времени в предельных по прочности состояниях. Опасные точки идентифицируются как точки касания

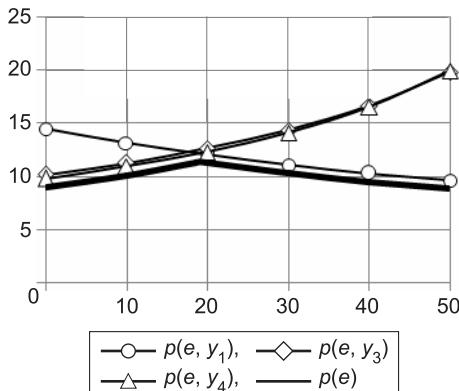


Рис. 2. Изменение предельного параметра нагрузок  $p$  (кН) в зависимости от эксцентрикитета  $e$  (мм) при  $\chi_1 = 0,6; \chi_2 = 0,8$

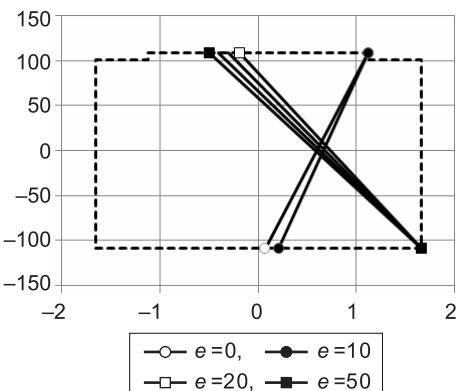


Рис. 3. Линии распределения амплитудной деформации в опасном сечении в критический момент времени при  $\chi_1 = 0,6; \chi_2 = 0,8$ ; по горизонтали  $\varepsilon(y) \cdot 10^3$ , по вертикали  $y$  в мм; пунктир — предельные деформации материалов

линии  $\varepsilon(y) = p^* \cdot \bar{\varepsilon}(y)$  и показанной пунктиром линии предельных деформаций  $\pm \varepsilon_{k.adm}^{\pm}(y)$  материалов.

При изменении эксцентрикитета  $e \in [0,60]$  (мм) выявлено три последовательных интервала с границами:  $e \approx 18; 46$  с различными отношениями предельных нагрузок  $p^*(e, y_1), p^*(e, y_3), p^*(e, y_4)$ . Критерий прочности (15) в них выполнялся в форме одноточечного равенства при различных координатах  $y_*$  опасной точки. Из таблицы видно, что в первом интервале  $e \in [0,18]$  наиболее опасная точка расположена на наружной границе третьего слоя и  $y_* = y_4$ . Во втором ( $y_* = y_1$ ) она переходит на наружную поверхность первого слоя. В третьем, по сравнению со вторым интервалом, изменяются уровни деформированности в точках  $y_3, y_4$ , однако наиболее опасной по-прежнему остается точка  $y_* = y_1$ . Случай расположения опасной точки  $y_* = y_3$  реализуется для других направлений  $\lambda$ .

### Значения предельной нагрузки и критического времени при $\lambda = (0,6; 0,8)$

$e$ , мм	$y^* = y_1$		$y^* = y_3$		$y^* = y_4$	
	$p^*$	$t_*$	$p^*$	$t_*$	$p^*$	$t_*$
0	14,448	0,5355	10,125	0,0928	9,774	0,0928
10	13,112	0,5355	11,222	0,0929	10,883	0,0929
20	12,001	0,5356	12,586	0,0930	12,276	0,0929
30	11,064	0,5356	14,326	0,0931	14,077	0,0931
40	10,263	0,3564	16,622	0,0933	16,493	0,0932
50	9,569	0,5357	19,787	0,0937	19,898	0,0940

На границах первого и второго интервалов повышение кратности выполнения критерия прочности до двух не происходит, так как смена положения опасной точки сопровождается переходом к иному критическому моменту времени. Для других направлений  $\lambda$  возникали ситуации с несколькими одинаково опасными точками, например,  $y_* = y_1, y_3, y_* \in [y_3, y_4]$ . Данные состояния могут быть идентифицированы по наличию точек пересечения графиков  $p^*(e, y)$  (см. рис. 2) при примерно совпадающем времени  $t_*$ .

В слоистом стержне наблюдается дискретное изменение координаты  $y_*$  опасной точки. В зависимости от полей динамических внутренних силовых факторов и прочностных свойств материалов в слоях она может располагаться как на наружных, так и на внутренних границах слоев. В последнем случае дальнейшее увеличение амплитуды нагрузок приводит к скрытому разрушению, что при статическом нагружении было показано в [3].

Заметим, что наблюдаемые на рис. 3 ситуации касания линий  $\varepsilon(y)$  и  $\pm\varepsilon_{k,adm}^\pm(y)$ , т.е. выполнение условия прочности в форме строгого равенства (15) относятся в динамических задачах лишь к критическому моменту времени  $t_*(P, e)$ . В иные моменты времени  $t \neq t_*$  линия  $\varepsilon(y)$  располагается внутри предельного полигона при отсутствии точек касания и пересечения.

Для установления критических моментов времени исследовались процессы развития деформаций  $\bar{\varepsilon}(t)$  в предположительно опасных точках. Графики некоторых из таких процессов (для двух случаев:  $e = 0$ ,  $e = 20$  мм при  $\chi_1 = 0,6$ ;  $\chi_2 = 0,8$ ) приведены на рис. 4. В первом из них в опасной точке  $y_* = y_4$  в критический момент времени  $t_* = 0,0928$  с при нагрузке  $p = 9,774$  кН деформация достигает максимума  $\varepsilon(x_*, y_4, t_*) = \varepsilon_{adm,3}$ . Во втором случае в критический момент времени  $t_* = 0,5356$  с при нагрузке  $p = 12,001$  кН деформация  $\varepsilon(x_*, y_1, t_*)$  равна предельной  $\varepsilon_{adm,1}$  в точке  $y_* = y_1$ . Во все иные моменты времени и для других точек модуль деформации меньше предельной деформации для соответствующего материала.

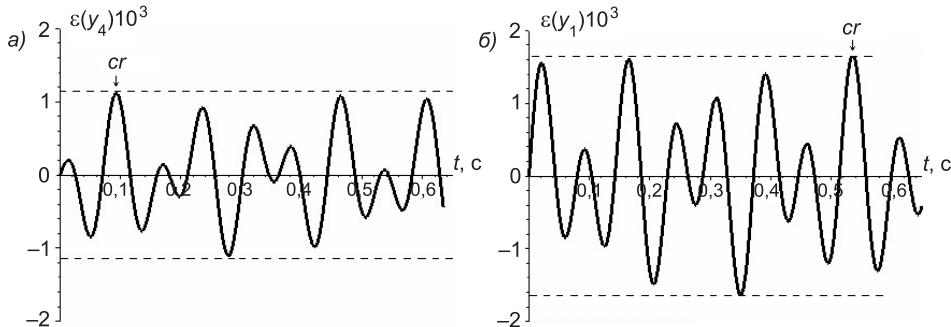


Рис. 4. Деформации  $\varepsilon(t)10^3$  в опасной точке при  $\chi_1 = 0,6$ ;  $\chi_2 = 0,8$ ;  $e = 0$  (а);  $e = 20$  (б), пунктир — предельные деформации материалов;  $cr$  — критический момент времени

Предельная линия в целом (15), (17) для трех эксцентрикитетов  $e = 0, 20, 40$  мм при численном задании направлений (21) построена на рис. 5. На гладких ее участках координаты  $x_*$ ,  $y_*$  постоянны, а в угловых точках они и время  $t_*$  изменяются дискретно. Для заданного симметричного сечения предельная линия обладает симметрией относительно начала координат.

В конструкциях с несимметричным распределением прочностных характеристик  $R_k^\pm$  возможны ситуации роста несущей способности при введении дополнительных нагрузок или увеличении параметров (амплитуд, эксцентрикитетов и др.) существующих. Проанализируем результаты расчета стержня при  $e = 20$  мм в трех случаях: а)  $\lambda = (1, 0)$ , б)  $\lambda = (0,95; -0,312)$ , в)  $\lambda = (0,8; -0,6)$ . Значения предельного параметра  $p_1$  для них соответственно составили (кН): 11,77; 13,03; 9,92. В случае (а) опасная точка  $y_* = y_4$  рас-

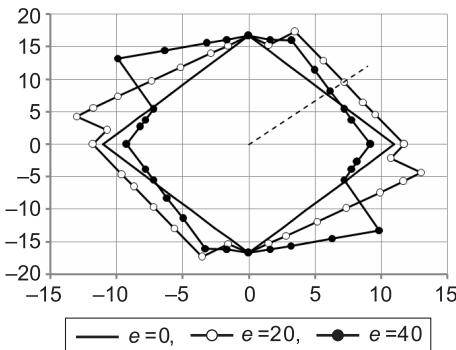


Рис. 5. Линии предельных состояний (15) при  $e = 0, 20, 40$  мм. По горизонтали  $p_1$ , по вертикали  $p_2$  (кН); пунктир — направление (21)  $\lambda = (0,6; 0,8)$

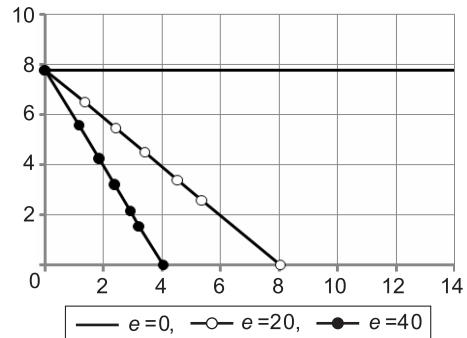


Рис. 6. Линии предельных состояний (27) при  $e = 0, 20, 40$  мм. По горизонтали  $p_1$ , по вертикали  $p_2$  (кН)

полагалась в третьем слое с предельной деформацией  $\varepsilon_{adm,3} = 0,001122$ , затем в случае (б) она переместилась в первый слой  $y_* = y_1$  с большей величиной предельной деформации  $\varepsilon_{adm,1} = 0,001658$ , что, согласно (22), позволило повысить значение предельной нагрузки с 11,77 до 13,03 кН (крайняя правая точка на рис. 5). Это объясняется частичной компенсацией изгибных деформаций от момента  $Fe$  на правом конце стержня и от поперечной нагрузки  $q$ . Аналогичные эффекты в статике рассматривались в [4]. При дальнейшем увеличении нагрузки второго варианта в случае (в) в опасной точке  $y_* = y_1$  развиваются более значительные деформации по сравнению со случаем (б), что требует снижения параметра нагрузки.

Графики на рис. 2, 5 показывают, что при заданном сочетании нагрузок может быть поставлена задача максимизации предельной нагрузки путем регулирования эксцентрициитета  $e$ . Это может иметь значение в практических приложениях динамики конструкций.

Покажем на примере того же стержня применение условия жесткости (24) для оценки предельных состояний, согласно определению 2 [1]. В качестве контролируемого перемещения  $\delta$  используем прогиб  $v(l)$  на правом конце стержня с предельным значением  $v_{adm} = l/200$ .

С учетом полученных выше решений  $V_F(x, p_1)$ ,  $V_q(x, p_2)$  второго уравнения (б) условие предельного состояния (27) примет вид

$$v(l, t_*, p_1, p_2) = V_F(l, p_1) \sin \omega_1 t_* + V_q(l, p_2) \sin \omega_2 t_* = \pm v_{adm}.$$

Численные расчеты предельных параметров нагрузок выполнены по опорным точкам методом заданных направлений (21). Двухосно симметричные предельные линии  $\psi(p_1, p_2) = 0$  на рис. 6 показаны в первом квадранте для трех значений эксцентрициитетов  $e = 0, 20, 40$  мм. Все три линии практически прямолинейны. Критическое время  $t_*(\lambda)$ , с, составило: 0,0185 — для  $\lambda(0,1)$ ; 0,0314 — для  $\lambda = (0,1)$  и 0,535 — для всех других направлений  $\lambda$ . Поскольку при  $e = 0$  нагрузка первого варианта не вызывает изгиба, то предельная линия в этом случае горизонтальна.

Предельные состояния в динамических задачах при действии высокочастотных нагрузок весьма чувствительны к критическому моменту времени, что значительно осложняет решение. Однако очевидно, что при рассмотрении отрезка времени достаточной протяженности  $T$  найдется момент, одновременно кратный временам максимумов (минимумов) всех функций частных колебаний. В этот момент времени происходит сумми-

рование амплитудных значений контролируемых величин всех вариантов, что характерно для критического момента времени.

Так, в рассмотренных примерах, за исключением случаев, близких к однопараметрическим нагружениям (вектор направления (21) близок к осям  $p_1$ ,  $p_2$ ), критические моменты времени чаще всего составляли  $t_* \approx 0,535$  с, что равно 28,96 четвертей периодов колебаний в первом и 16,98 — во втором вариантах нагружений.

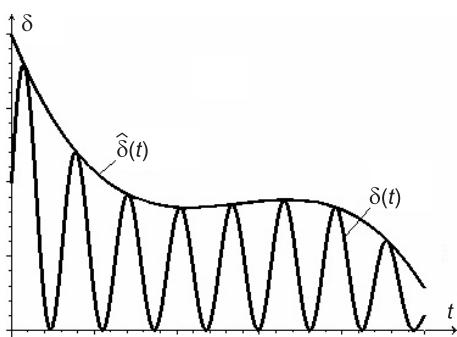


Рис. 7. Построение огибающей  $\hat{\delta}(t)$  динамических перемещений  $\delta(t)$

ния, так как при установившемся движении получаем  $\delta(t) = \text{const}$  и задача становится квазистатической. Осуществив вышеуказанную замену в предельных условиях (15), (27), получим

$$\sum_{j=1}^{n_F} p_{j,u} [\hat{u}'_{ij}(x_*) - \hat{v}''(x_*) y_*] = \pm \varepsilon_{k,adm}^{\pm}, \quad \sum_{j=1}^{n_F} p_j \hat{\delta}(x_*) = \pm \delta_{adm}.$$

При фиксированных  $x_*$ ,  $y_*$  это уравнения гиперплоскостей в пространстве  $P$ .

По этой причине участки предельных линий на рис. 5, 6 с фиксированными координатами опасных точек прямолинейны. В рассмотренных примерах они заданы уравнениями:

$$U'_F(x_*, p_1) - y_* [V''_F(x_*, p_1) + V''_q(x_*, p_2)] = \pm \varepsilon_{k,adm}^{\pm},$$

$$V_F(l, p_1) + V_q(l, p_2) = \pm v_{adm}.$$

**Выводы.** 1. Рассмотрены постановки решений обратных динамических задач о предельных состояниях рам со слоистыми стержнями при многопараметрическом нагружении по критериям прочности и жесткости.

2. Разработан численный метод расчета предельных состояний по заданным направлениям в пространстве параметров нагрузок.

3. Предложен эффективный упрощенный подход к расчету и проектированию рам при высокочастотных и гармонических колебаниях, основанный на замене законов изменения динамических перемещений их огибающими.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мищенко, А.В. Несущая способность слоистых стержней и рам при многопараметрическом динамическом воздействии (сообщение 1) [Текст] / А.В. Мищенко, Ю.В. Немировский // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 3. — С. 3–11.
2. Смирнов, А.Ф. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений [Текст] / А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Б.Я. Лашеников, Н.Н. Шапошников. — М. : Стройиздат, 1984. — 415 с.

В случаях воздействия на раму высокочастотных нагрузок может быть предложена упрощенная методика расчета, основанная на замене функций перемещений  $\delta(t)$  (или внутренних силовых факторов) их огибающими  $\hat{\delta}(t)$  (рис. 7). Несмотря на кардинальное упрощение решения в данном случае не происходит ощутимого снижения точности вычисления предельных нагрузок. В особенности это становится эффективным в случае гармонических колебаний без учета сил сопротивления.

3. Немировский, Ю.В. Влияние выбора материалов и структуры конструкции на пластическое деформирование и разрушение слоистых стержневых систем [Текст] / Ю.В. Немировский, А.В. Мищенко // Физическая мезомеханика. — 2004. — Т. 7, ч. 1. — С. 180–183.
4. Мищенко, А.В. Повышение эффективности равнопрочных слоистых стержневых конструкций путем регулирования полей усилий и нагрузок [Текст] / А.В. Мищенко, Ю.В. Немировский // Проблемы оптимального проектирования сооружений : сб. докл. IV всерос. сем. — Новосибирск : НГАСУ, 2002. — С. 248–262.

*МИЩЕНКО А.В., канд. техн. наук, доц.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*НЕМИРОВСКИЙ Ю.В., д-р физ.-мат. наук, проф.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено после доработки 15.03.11

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

**Nemirovsky Yu.V.**, doctor of physical and mathematical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **LAYERED RODS AND FRAMES LOAD CAPACITY ON MULTIPARAMETER DYNAMIC INFLUENCE**

### Report 2

The computational investigation of strength and rigidity ultimate states of two harmonic forces action to layered rod are considered on the theory, discuss in report 1.

**Key words:** layered rod, dynamical forces, multiparameter loading, ultimate load.

### REFERENCES

1. Mishchenko, A.V. Layered rods and frames load capacity on multiparameter dynamic influence (Report 1) [Text] / A.V. Mishchenko, Yu.V. Nemirovsky // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 3. — P. 3–11.
2. Smirnov, A.F. Structural mechanics. Dynamic and stability of constructions [Text] / A.F. Smirnov, A.V. Alexandrov, B.Ya. Lashenikov, N.N. Shaposhnikov. — M. : Stroyizdat, 1984. — 415 p.
3. Nemirovsky, Yu.V. Influence of choice materials and constructions structure on plastic deformation and destruction of layered Rods and rods system [Text] / Yu.V. Nemirovsky, A.V. Mishchenko // Physical mesomechanic. — 2004. — Vol. 7, part 1. — P. 180–183.
4. Mishchenko, A.V. Rise of effectiveness equal-strength layered rod constructions by fields of forces and loads regulation [Text] / A.V. Mishchenko, Yu.V. Nemirovsky // Problems of optimal constructions design : reports of IV-th All-Russian sem. — Novosibirsk : NSUACE, 2002. — P. 248–262.

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.54.004.4

Г.И. БЕРДОВ, Л.В. ИЛЬИНА, В.А. СУХАРЕНКО

### ВЛИЯНИЕ СОВМЕСТНОГО ВВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛИТОВ И МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ НА ОСНОВЕ КЛИНКЕРА, ХРАНИВШЕГОСЯ ДЛИТЕЛЬНОЕ ВРЕМЯ ВО ВЛАЖНЫХ УСЛОВИЯХ

Повышение прочности цементного камня из клинкера, хранившегося в течение 4 и 12 мес во влажных условиях может быть обеспечено введением в воду затворения 1 мас. %  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ . Дополнительное повышение прочности цементного камня, особенно получаемого из клинкера, хранившегося в течение 12 мес во влажных условиях, может быть обеспечено добавкой 7 мас. % измельченного диопсида.

Ключевые слова: портландцементный клинкер, длительное хранение, механическая прочность, минеральные добавки, электролиты.

Распределение производства цемента по территории России неравномерно. Основное его производство сосредоточено в Центральном федеральном округе (около 30 % всего отечественного цемента). За пределами единой железнодорожной сети РФ находятся: большая часть территории Республики Саха (Якутия), Камчатской и Магаданской областей, Корякского, Чукотского, Ненецкого автономных округов, значительная часть территории Красноярского края. В этом случае цемент транспортируется водным транспортом в период краткосрочной летней навигации и вынужденно подвергается длительному хранению. Воздействие окружающей среды приводит к частичной гидратации и карбонизации цемента. Это обуславливает снижение его активности при гидратационном твердении, уменьшение прочности [1].

Цемент удовлетворяет требованиям действующих стандартов при соблюдении правил его хранения и транспортирования в течение 45 сут для быстротвердеющих и 60 сут для остальных видов цемента при условии поставки в таре. Однако при использовании цемента в отдаленных районах Сибири, Севера и Дальнего Востока создать такие условия практически невозможно.

Длительное хранение цемента даже при благоприятных условиях вызывает потерю его активности. После 4 мес хранения в нормальных условиях потеря активности его достигает 25 %, а через 12 мес — 40 %. Эта потеря возрастает при хранении цемента во влажных условиях. После 4 мес такого хранения снижение активности составляет 50 %, после 12 мес — около 70 % [2].

Это обуславливает необходимость поиска методов повышения активности цементных материалов после их длительного хранения. Одним из

таких методов может быть совместное введение добавок электролитов и минеральных добавок.

В данной работе исследован клинкер для изготовления портландцемента производства ООО «Искитимцемент» (Новосибирская обл.) марки ПЦ 400 Д-20. Минералогический состав его, по данным завода изготовителя, мас. %:  $C_3S$  — 50...55,  $C_2S$  — 18...22,  $C_3A$  — 7...11,  $C_4AF$  — 12...15. Химический состав исследованного клинкера, мас. %:  $SiO_2$  — 20,7;  $Al_2O_3$  — 6,9;  $Fe_2O_3$  — 4,6;  $CaO$  — 65,4;  $MgO$  — 1,3;  $SO_3$  — 0,4; п.п.п. — 0,5. Клинкер хранился в виде гранул с размером 10–20 мм. Перед приготовлением образцов для определения механической прочности клинкер измельчали до удельной поверхности 320  $m^2/kг$ .

Исследованы образцы клинкера после хранения в течение 7 сут при нормальных условиях (температура  $20 \pm 2$  °C, влажность не более 60 %), после хранения в течение 4 и 12 мес в среде с влажностью около 80 % при температуре  $20 \pm 2$  °C.

Ранее проведенными экспериментами установлено значительное повышение прочности цементного камня, в том числе полученного из портландцемента и клинкера, хранившихся в течение 4 и 12 мес во влажной среде, при введении в воду затворения электролитов и при добавлении к цементу или размолотому клинкеру минеральных добавок. При этом эффективными являются электролиты с многозарядными катионами, такие как  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $Fe_2(SO_4)_3$  [3]. Эффективные минеральные добавки — волластонит и диопсид. Их оптимальное количество при удельной поверхности 200–350  $m^2/kг$  составляет 7–9 %.

В работе использовали измельченный волластонит Синюхинского месторождения (рудник Веселый, Республика Алтай). Его химический состав, мас. %:  $SiO_2$  — 53,4;  $Al_2O_3$  — 3,1;  $Fe_2O_3$  — 2,4;  $CaO$  — 34,7;  $MgO$  — 0,3; п.п.п. — 6,4. Добавка волластонита практически полностью представлена однокальциевым силикатом ( $CaO \cdot SiO_2$ ). Удельная поверхность порошка 355  $m^2/kг$ , среднеобъемный размер зерен волластонита, определенный методом лазерной гранулометрии, 28,8 мкм.

Диопсидовая добавка представляла собой измельченную вмещающую породу — отход от переработки флюгопитовых руд Алданского месторождения. Ее химический состав, мас. %:  $SiO_2$  — 50,3;  $Al_2O_3$  — 3,4;  $Fe_2O_3$  — 5,8;  $CaO$  — 24,6;  $MgO$  — 15,6;  $R_2O$  — 0,3. Добавка составлена в основном силикатом кальция-магния — диопсидом ( $CaO \cdot MgO \cdot SiO_2$ ). Удельная поверхность порошка 210  $m^2/kг$ , среднеобъемный размер зерен волластонита, определенный методом лазерной гранулометрии, 38,6 мкм.

В данной работе исследовано совместное действие электролитов, введенных в количестве 1 мас. % в воду затворения, и минеральных добавок (волластонит и диопсид), введенных в количестве 7 мас. % клинкера.

Так как возможно длительное хранение не только портландцемента, но и клинкера, исследовано совместное действие электролитов и минеральных добавок на прочностные показатели цементного камня, изготовленного на основе клинкера.

Добавки волластонита и диопсида в количестве 7 мас. % клинкера вводились при его измельчении. При этом добавляли также 5 % двуводного гипса. Добавку электролитов в количестве 1 мас. % цемента вводили в воду затворения. В качестве добавок использованы электролиты с многозарядными катионами ( $Fe^{+3}$ ,  $Al^{+3}$ ):  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $Fe_2(SO_4)_3$ .

Определение прочности при сжатии проверено на образцах с размерами  $20 \times 20 \times 20$  мм, изготовленных из цементного теста нормальной густоты. Тепловлажностная обработка проводилась по режиму: 3 ч — подъ-

ем температуры до 90 °С, 8 ч — изотермическая выдержка при данной температуре и 3 ч — снижение температуры до 20 °С.

При введении добавки электролита прочность образцов, полученных из свежеразмолотого клинкера, повышается на 65 % в случае твердения при тепловлажностной обработке и на 50 % после 28 сут твердения при нормальных условиях (табл. 1). При дополнительном введении 7 % волластонита увеличения прочности не происходит. Введение 7 мас. % диопсида приводит к дополнительному повышению прочности. Из исследованных электролитов более эффективен  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ .

**Таблица 1**  
**Влияние добавок 1 мас. % электролита и 7 мас. % минеральных наполнителей на прочность при сжатии (МПа) образцов из свежемолотого портландцементного клинкера**

Вид и количество добавок						
без добавок	добавка 1 мас. % электролитов		добавка 7 мас. % волластонита и 1 мас. % электролита		добавка 7 мас. % диопсида и 1 мас. % электролита	
	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
<i>Твердение в условиях тепловлажностной обработки</i>						
55,1	90,9	89,0	84,8	87,1	107,0	105,4
<i>Твердение 28 сут в нормальных условиях</i>						
64,8	95,2	89,5	90,9	95,6	113,4	110,2

В табл. 2, 3 приведены аналогичные данные по влиянию электролитов и минеральных добавок на прочность образцов, полученных из портландцементного клинкера, хранившегося во влажных условиях соответственно 4 и 12 мес.

При введении 1 мас. % сульфатов алюминия и железа прочность образцов, изготовленных из клинкера, хранившегося в течение 4 мес во влажных условиях, возрастает после тепловлажностной обработки на 72 %, после твердения в течение 28 сут при нормальных условиях — на 55 %. При этом значения прочности в обоих случаях практически одинаковы, в то время как в отсутствие добавок электролитов прочность образцов после 28 сут твердения при нормальных условиях превышает прочность образцов после тепловлажностной обработки на 11 %. Дополнительное введение волластонита (7 мас. %) малоэффективно. Прочность образцов после 28 сут нормального твердения такова же, что и без этой

**Таблица 2**  
**Влияние добавок 1 мас. % электролитов и 7 мас. % минеральных наполнителей на прочность при сжатии (МПа) образцов, изготовленных из портландцементного клинкера, хранившегося в течение 4 мес во влажных условиях**

Вид и количество добавок						
без добавок	добавка 1 мас. % электролитов		добавка 7 мас. % волластонита и 1 мас. % электролита		добавка 7 мас. % диопсида и 1 мас. % электролита	
	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
<i>Твердение в условиях тепловлажностной обработки</i>						
55,7	96,5	94,3	82,0	82,9	101,7	100,8
<i>Твердение 28 сут в нормальных условиях</i>						
61,9	96,5	95,2	91,8	91,0	109,8	112,3

Таблица 3

**Влияние добавок 1 мас. % электролитов и 7 мас. % минеральных наполнителей на прочность при сжатии (МПа) образцов, приготовленных из портландцементного клинкера, хранившегося в течение 12 мес во влажных условиях**

Вид и количество добавок						
без добавок	добавка 1 мас. % электролитов		добавка 7 мас. % волластонита и 1 мас. % электролита		добавка 7 мас. % диопсида и 1 мас. % электролита	
	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
<i>Твердение в условиях тепловлажностной обработки</i>						
43,5	74,2	73,5	76,1	75,4	85,1	84,2
<i>Твердение 28 сут в нормальных условиях</i>						
48,4	75,6	74,2	82,7	81,0	95,7	94,4

добавки. После тепловлажностной обработки фиксируются даже меньшие значения прочности, чем при отсутствии добавки волластонита. Дополнительно к электролитам введение 7 мас. % диопсида обуславливает дальнейшее повышение прочности на 20 %.

В случае хранения портландцементного клинкера в течение 12 мес во влажных условиях отмечено снижение прочности цементного камня при отсутствии добавок. После тепловлажностной обработки оно составляет 21 %, после 28 сут нормального твердения — 25 %. Введение 1 мас. % электролитов в воду затворения способствует увеличению прочности цементного камня до значений, превышающих прочность исходных (контрольных) образцов без добавок. Это превышение составляет после тепловлажностной обработки — 35 %, после 28 сут твердения при нормальных условиях — 16 %. Дополнительное введение 7 мас. % волластонита или диопсида приводит к увеличению прочности образцов. При этом более существенно действие диопсида. Прочность образцов при введении его добавки в количестве 7 % увеличивается примерно на 30 %.

Таким образом, повышение прочности цементного камня из клинкера, хранившегося в течение 4 и 12 мес во влажных условиях может быть обеспечено введением в воду затворения 1 мас. %  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ . Дополнительное повышение прочности цементного камня, особенно получаемого из клинкера, хранившегося в течение 12 мес во влажных условиях, может быть обеспечено добавкой 7 мас. % измельченного диопсида.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецова, Т.В. Физическая химия вяжущих материалов [Текст] / Т.В. Кузнецова, И.В. Куряшов, В.В. Тимашев. — М. : Высш. шк., 1989. — 384 с.
2. Ильина, Л.В. Влияние продолжительности и условий хранения портландцемента на его свойства [Текст] / Л.В. Ильина, Г.И. Бердов, А.В. Мельников // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 6. — С. 19–23.
3. Бердов, Г.И. Влияние добавок электролитов на прочность образцов, изготовленных из длительно хранившегося портландцемента [Текст] / Г.И. Бердов, Н.А. Машкин, Л.В. Ильина, М.А. Раков // Строительные материалы. — 2010. — № 8. — С. 48–50.

БЕРДОВ Г.И., д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

*ИЛЬИНА Л.В., канд. техн. наук, доц.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*СУХАРЕНКО В.А., студ.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено после доработки 07.12.10

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

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

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

## **EFFECT OF COMBINED ADMINISTRATION OF ELECTROLYTES AND MINERAL SUPPLEMENTS FOR THE STRENGTH OF CEMENT STONE ON THE BASIS OF CLINKER, STORED ABOVE IN WET CONDITIONS**

Increase the strength of cement clinker, stored for 4 and 12 months in damp conditions can be achieved by introducing the mixing water of 1 % wt.  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ . An additional increase in strength of cement stone, especially derived from clinker stored for 12 months in damp conditions, can be achieved supplement 7 % wt. ground diopside.

**Key words:** portland cement clinker, long-term storage, mechanical strength, mineral supplements, electrolytes.

### REFERENCES

1. Kuznetsova, T.V. Physical chemistry of binders [Text] / T.V. Kuznetsova, I.V. Kudryashov, V.V. Timashev. — M. : Higher school, 1989. — 384 p.
2. Ilina, L.V. Effect of duration and storage conditions on the properties of portland cement [Text] / L.V. Ilina, G.I. Berdov, A.V. Melnikov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 6. — P. 19–23.
3. Berdov, G.I. Effect of electrolyte additives on the strength of samples prepared from long storage portland [Text] / G.I. Berdov, N.A. Mashkin, L.V. Ilina, M.A. Rakov // Building materials. — 2010. — N 8. — P. 48–50.

УДК 691.31:666.964.3

И.В. МАРДИРОСОВА, Н.Х. ЧАН, О.А. БАЛАБАНОВ

## МОДИФИЦИРОВАННОЕ АСФАЛЬТОВОЕ ВЯЖУЩЕЕ ПОВЫШЕННОЙ СТОЙКОСТИ К СТАРЕНИЮ

Изучено влияние комплексного модификатора из резинового термоэластопласта и гидратной извести на физико-механические показатели свойств асфальтового вяжущего до и после старения. Результаты проведенных исследований позволили установить, что использование разработанной добавки в составе асфальтового вяжущего оказывает положительное воздействие на замедление процессов его старения, обеспечивая тем самым необходимые свойства асфальтобетона. Показано, что с увеличением концентрации модификатора старение вяжущего замедляется. Однако использование указанной добавки не исключает полностью этот процесс.

**Ключевые слова:** асфальтовое вяжущее, стойкость к старению, комплексный модификатор, резиновый термоэластопласт, гидратная известь.

Одна из самых актуальных проблем современного дорожного строительства — повышение долговечности асфальтобетона — во многом зависит от структуры и свойств применяемых органических вяжущих веществ и, прежде всего, их склонности к старению. Основные факторы, вызывающие химическое старение битума, — несоблюдение технологических режимов при приготовлении и укладке асфальтобетонных смесей, а также воздействие кислорода воздуха и солнечной радиации при эксплуатации покрытий в жаркое время года. Под влиянием этих факторов в битуме происходят глубокая полимеризация и окислительная модификация смол и масел, сопровождаемая необратимыми изменениями фазового состава органического вяжущего. В результате битум теряет упругопластичные свойства, приобретает хрупкость, понижается его адгезия к поверхности минеральных составляющих асфальтобетона. Все это, в конечном итоге, приводит к снижению водо-, морозо- и трещиностойкости асфальтобетона и его преждевременному разрушению.

Отечественными и зарубежными исследователями накоплен значительный опыт по направленному регулированию структурно-реологических свойств битума и повышению его стойкости к старению за счет применения различных модифицирующих добавок типа эластомеров (натурального и синтетического каучуков), резины, серы, полиолефинов, минеральных порошкообразных и волокнистых отходов промышленных производств и т.п. [1, 2].

Дисперсные частицы большинства из перечисленных добавок структурируют битум, образуя с ним коллоидную систему, которая во многом определяет физико-механические и эксплуатационные свойства асфальтобетона. Известно, что в качестве добавок, структурирующих битум, целесообразно применять минеральные порошки основного характера. В этом случае кроме межмолекулярных сил и коллоидных образований на свойства микроструктуры асфальтобетона большое положительное влияние оказывают хемосорбционные процессы на границе битум / минеральный материал.

В настоящей работе исследована возможность повышения стойкости асфальтового вяжущего к старению за счет его модификации комплексной добавкой из резинового термоэластопласта (РТЭП) и гидратной извести (ГИ).

РТЭП представляет собой гранулированную добавку сферовидной формы с диаметром частиц 3–4 мм, разработанную в ДорТрансНИИ РГСУ. Добавка содержит полиолефиновый компонент, резиновую крошку размером зерен до 0,6 мм, битум и антиоксиданты. Такая композиция характеризуется наличием значительного количества ненасыщенных связей, свойственных резинополимерным соединениям [2, 3]. За счет потенциала этих связей происходит активное взаимодействие модификатора с битумными частицами, главным образом, асфальтенами ароматических соединений, изменяющими коллоидную структуру вяжущего.

Порошкообразную гидратную известь, образующуюся в результате гашения комовой строительной извести водой, при введении в состав минерального порошка можно рассматривать как нанодисперсный компонент (размер большинства зерен меньше 100 нм), резко увеличивающий его удельную поверхность. При этом, являясь гидроксидом кальция, она способна вступать в химические реакции с асфальтогеновыми кислотами битума, оказывая положительное влияние на формирование структуры асфальтовяжущего.

Для приготовления асфальтового вяжущего использовали вязкий нефтяной дорожный битум марки БНД 60/90 и активированный известняковый минеральный порошок в соотношении 1 : 1,5 по массе. Такое соотношение вяжущего к минеральному порошку наиболее полно соответствует составам плотных асфальтобетонных смесей, рекомендуемых ГОСТ 9128–2009, и согласуется с исследованиями асфальтового вяжущего авторами работы [3]. Основываясь на результатах наших предыдущих исследований, добавку РТЭП вводили в количестве 5 % от массы битума<sup>1</sup>, а гидратной известью заменили от 10 до 30 % минерального порошка. Превышение этой дозировки нецелесообразно, так как замена известью более 30 % минерального порошка приводит к чрезмерному повышению температуры размягчения и понижению глубины проникания иглы асфальтовяжущего, что может негативно сказаться на удобообрабатываемости асфальтобетонной смеси.

В процессе лабораторных исследований определяли физико-химические свойства и стойкость к старению следующих лабораторных составов:

- 1 — чистого битума;
- 2 — асфальтового вяжущего без добавок;
- 3 — асфальтового вяжущего, модифицированного добавкой РТЭП;
- 4 — асфальтового вяжущего, модифицированного добавкой РТЭП, в котором 10 % минерального порошка заменили гидратной известью;
- 5 — то же, 20 %;
- 6 — то же, 30 %.

Оценку склонности вышеназванных составов к старению проводили по американской методике TFOT (Thin Film Oven Test) согласно стандарту ASTM D 1754. Материал подогревали в тонком слое, толщиной 3,2 мм, в формах диаметром 140 мм и высотой 9,5 мм. Формы находились на вращающейся со скоростью 6 об / мин полке термостата с циркуляцией воздуха. Эксперимент проводили в течение 5 ч при температуре 163 °C.

<sup>1</sup> Илиополов С.К., Мардиросова И.В. Влияние модификатора РТЭП и добавки «Viatop-66» на свойстваЩМА // Наука и техника в дорожной отрасли. 2010. № 2. С. 38–40.

Для всех исследованных составов до и после старения исследовали:

- глубину проникания иглы при 25 °C ( $\Pi$  и  $\Pi^c$ ), 0,1 мм;
- растяжимость при 25 °C ( $P$  и  $P^c$ ), см;
- эластичность ( $\mathcal{E}\mathcal{L}$  и  $\mathcal{E}\mathcal{L}^c$ ), %;
- температуру хрупкости ( $T_x$  и  $T_x^c$ ), °C;
- температуру размягчения ( $T_p$  и  $T_p^c$ ), °C;
- изменение температуры размягчения после прогрева, °C.

Оценку стойкости чистого битума и асфальтового вяжущего к старению проводили с использованием предложенных в [3] коэффициентов изменения важнейших физико-химических показателей, %, рассчитывающихся по формулам:

- глубины проникания иглы  $K_{\Pi}^c = (\Delta\Pi / \Pi) \cdot 100 \%$ , где  $\Delta\Pi = |\Pi^c - \Pi|$ ;
- температуры размягчения  $K_{T_p}^c = (\Delta T_p / T_p) \cdot 100 \%$ , где  $\Delta T_p = |T_p^c - T_p|$ ;
- температуры хрупкости  $K_{T_x}^c = (\Delta T_x / T_x) \cdot 100 \%$ , где  $\Delta T_x = |T_x^c - T_x|$ ;
- растяжимости  $K_p^c = (\Delta P / P) \cdot 100 \%$ , где  $\Delta P = |P^c - P|$ ;
- эластичности  $K_{\mathcal{E}\mathcal{L}}^c = (\Delta \mathcal{E}\mathcal{L} / \mathcal{E}\mathcal{L}) \cdot 100 \%$ , где  $\Delta \mathcal{E}\mathcal{L} = |\mathcal{E}\mathcal{L}^c - \mathcal{E}\mathcal{L}|$ .

Результаты испытаний приведены в табл. 1, а рассчитанные коэффициенты изменения важнейших физико-химических показателей исследованных составов — в табл. 2.

Представленные в таблицах данные показывают, что предлагаемый комплексный модификатор, состоящий из резинового термоэластопласта и гидратной извести, оказывает заметное структурирующее влияние на асфальтовое вяжущее. Модифицированное вяжущее по сравнению с исходным характеризуется меньшей глубиной проникания иглы и растяжимостью при 25 °C, большей температурой размягчения, эластичностью и пониженной температурой хрупкости.

Таблица 1

**Результаты определения физико-химических свойств исследованных составов**

Номер состава	Глубина проникания иглы при 25 °C, 0,1 мм	Растяжимость при 25 °C, см	Температура, °C		Изменение температуры размягчения после прогрева, °C	Эластичность, %
			размягчения	хрупкости		
1	65,0 39,0	100,0	48,0	-18,0	6,0	0
		56,0	54,0	-13,0		0
2	33,0 22,0	11,0	60,0	-16,0	5,0	16,0
		7,0	65,0	-12,0		20,0
3	27,0 19,0	10,2	70,0	-19,0	7,0	22,0
		6,8	75,0	-16,0		27,0
4	22,0 16,0	9,3	79,0	-20,0	6,0	29,0
		6,4	83,0	-18,0		35,0
5	21,0 15,5	8,0	83,0	-21,0	5,0	36,0
		5,6	86,5	-19,5		43,0
6	16,0 12,0	6,5	86,0	-21,0	4,0	45,0
		4,7	89,0	-20,0		53,0

Примечание. Над чертой показатели свойств исследованных составов до старения, под чертой — после старения.

Таблица 2

**Значения коэффициентов изменения физико-химических свойств исследованных составов**

Номер состава	Коэффициенты, %, изменения				
	глубины проникания иглы $K_p^c$	температуры размягчения $K_{T_p}^c$	растяжимости $K_p^c$	эластичности $K_{\text{ЭЛ}}^c$	температуры хрупкости $K_{T_x}^c$
1	40,0	12,5	44,0	—	27,8
2	33,3	8,3	40,7	25,0	25,0
3	29,6	7,1	33,3	22,7	15,8
4	27,3	5,7	31,2	20,7	10,0
5	26,3	4,2	30,0	19,4	7,1
6	25,0	3,5	27,7	17,8	4,8

В табл. 2 приведены зависимости коэффициентов  $K^c$  вяжущего, модифицированного 5 % РТЭП, от содержания гидратной извести в составе минерального порошка. Из представленных данных видно, что использование модифицирующих добавок РТЭП и ГИ во всех случаях понижает эти коэффициенты, т.е. процессы старения модифицированного асфальтового вяжущего по сравнению с немодифицированным замедляются.

Глубина проникания иглы, как следует из данных табл. 1, при введении в асфальтовое вяжущее гидратной извести понижается, что свидетельствует о повышении вязкости материала, обеспечивая асфальтобетону необходимые эксплуатационные свойства, такие как тепло- и сдвигостойчивость. Коэффициенты изменения глубины проникания иглы  $K_p^c$  в процессе старения имеют довольно высокие значения, уменьшаясь от 33,3 до 25,0 % (см. табл. 2). Понижение этого показателя с увеличением концентрации гидратной извести указывает на замедление процессов старения асфальтового вяжущего с введением модифицирующей добавки и о менее интенсивном их протекании.

Результаты изучения растяжимости модифицированного комплексной добавкой асфальтового вяжущего показывают понижение этого показателя в процессе старения для всех составов (см. табл. 1). Однако, анализируя результаты исследований, представленных в табл. 2, можно отметить, что введение добавок гидратной извести в состав минерального порошка положительно влияет на растяжимость асфальтового вяжущего в период его старения. Значения коэффициента изменения растяжимости вяжущего после старения понижались с повышением концентрации гидратной извести. Коэффициент  $K_p^c$  в процессе старения асфальтового вяжущего, не содержащего модифицирующих добавок, составил 40,7 %, в то время как у состава с использованием модифицированного битума и 30 % ГИ в минеральном порошке он понизился до 27,7 %.

Температура размягчения модифицированного асфальтового вяжущего в процессе старения повышается по сравнению с немодифицированным от 65 до 89 °С. Однако гидратная известь замедляет темп ее роста: коэффициент  $K_{T_p}^c$  без добавок 8,3 %, у модифицированного асфальтового вяжущего с 30 % ГИ он составляет 3,5 %, т.е. процесс старения понижается.

Температура хрупкости немодифицированного асфальтового вяжущего в процессе старения повышалась от -16 до -12 °С (см. табл. 1), коэффициент  $K_{T_x}^c$  достигал при этом 25 % (см. табл. 2). Вяжущее, модифицированное добавкой гидратной извести в количестве 30 %, в процессе старения понизило температуру хрупкости на 8 °С (от -12 до -20 °С).

Коэффициент изменения температуры хрупкости при этом уменьшился до 4,8 %, т.е процесс старения замедлился. Кроме того, после старения температура хрупкости модифицированного асфальтового вяжущего имела более отрицательное значение ( $-20^{\circ}\text{C}$ ), чем немодифицированного до старения ( $-16^{\circ}\text{C}$ ), что благоприятно сказывается на повышении работоспособности асфальтобетона в зимних условиях.

Коэффициент изменения эластичности асфальтового вяжущего в процессе старения в присутствии комплексного модификатора понижался от 25 до 17,8 %, что также служит свидетельством положительного влияния модификатора на показатель  $K_{\text{ЭЛ}}^c$  эластичности в процессе старения. Наличие свойств эластичности у асфальтовяжущего, как правило, благоприятно сказывается на циклической усталости асфальтобетонов при умеренных и низких отрицательных температурах.

Как видно из табл. 2 добавка РТЭП способствует некоторому понижению значений вышеназванных коэффициентов (состав 3). Это объясняется, прежде всего, наличием в составе резинового термоэластопласта антиоксидантов, замедляющих окислительные процессы в условиях повышенных температур, а также способностью гранул резинового термоэластопласта структурировать асфальтовое вяжущее. Гидратная известь в составе комплексного модификатора дополнительно усиливает замедление процесса старения асфальтового вяжущего, причем старение замедляется с увеличением ее количества от 10 до 30 % (составы 4–6). Это обусловлено тем, что при частичной замене минерального порошка более тонкодисперсной и химически активной гидратной известью изменяется характер взаимодействия компонентов вяжущего. Частицы гидроксида кальция являются более активными адсорбентами, а следовательно, и структурными центрами. За счет увеличения удельной поверхности минеральной части асфальтовяжущего количество структурированного битума значительно возрастает. При этом толщина образующихся адсорбционно-сольватных оболочек битума на поверхности зерен гидратной извести по сравнению с оболочками вокруг более грубых зерен минерального порошка уменьшается в 2–3 раза [4]. Структурированный битум, находящийся в ультратонких сольватных оболочках ГИ, отличается повышенной стойкостью к старению по сравнению со свободным.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность получения асфальтового вяжущего повышенной стойкости к старению за счет введения в его состав комплексного модификатора из резинового термоэластопласта и гидратной извести. Модифицированное вяжущее до старения также отличается лучшими показателями важнейших физико-химических свойств по сравнению с исходным. Полученные результаты позволяют прогнозировать закономерное повышение физико-механических и эксплуатационных свойств асфальтобетона на основе разработанного асфальтового вяжущего вещества.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калгин, Ю.И. Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов [Текст] / Ю.И. Калгин. — Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. архит.-строит. ун-та, 2006. — 272 с.
2. Руденский, А.В. Для всех климатических зон. Композиционные резинобитумные материалы широкого применения [Текст] / А.В. Руденский, Н.В. Смирнов // Дороги России XXI века. — 2002. — № 3. — С. 86–88.
3. Ивански, М. Асфальтобетон как композиционный материал [Текст] / М. Ивански, Н.Б. Урьев. — М. : «Техполиграфцентр», 2007. — 770 с.

4. Королев, И.В. Особенности взаимодействия компонентов в битумоминеральных системах [Текст] / И.В. Королев, А.Б. Соломенцев // Химия и технология топлив и масел. — 1993. — № 4. — С. 26–28.

*МАРДИРОСОВА И.В., канд. хим. наук, доц.; E-mail: isabellavm@rambler.ru*

*Ростовский государственный строительный университет*

*ЧАН Н.Х., асп.; E-mail: tnh82@mail.ru*

*Ростовский государственный строительный университет*

*БАЛАБАНОВ О.А., инж.*

*Ростовский государственный строительный университет*

Получено после доработки 10.03.11

**Mardirossova I.V.**, candidate of chemical sciences, assistant professor; E-mail: isabellavm@rambler.ru, Rostov State University of Civil Engineering, Russia

**Tran N.H.**, post-graduate student; E-mail: tnh82@mail.ru, Rostov State University of Civil Engineering, Russia

**Balabanov O.A.**, engineer, Rostov State University of Civil Engineering, Russia

## **THE MODIFIED ASPHALT BINDER INCREASED RESISTANCE TO AGING**

The effect of the complex modifier of thermoplastic rubber and hydrated lime on the physical-mechanical properties of asphalt binder before and after aging. The results of these studies revealed that the use of additives developed in the asphalt binder has a positive effect on slowing the aging process it, thus providing the necessary properties of asphalt concrete. It is shown that with increasing concentration of the modifier binder aging slows down. However, the use of this additive does not eliminate this process.

**Key words:** asphalt binder, aging resistance, complex modifier, thermoplastic rubber, hydrated lime.

## **REFERENCES**

1. K algin, Yu.I. Bituminous road materials based on modified bitumen [Text] / Yu.I. K algin. — Voronezh : Publisher VACE, 2006. — 272 p.
  2. Rudensky, A.V. For all climatic zones. Composite rubber bitumen material of wide application [Text] / A.V. Rudensky, N.V. Smirnov // Roads of Russia XXI century. — 2002. — N 3. — P. 86–88.
  3. Ivanski, M. Asphalt as a composite material [Text] / M. Ivanski, H.B. Urev. — M. : «Techpoligrafcentre», 2007. — 770 p.
  4. Korolev, I.V. Features of interaction of components in bituminous systems [Text] / I.V. Korolev, A.B. Solomentsev // Chemistry and technology of fuels and oils. — 1993. — N 4. — P. 26–28.
-

УДК 666.9.015.7

В.Г. КЛИМЕНКО

## АКТИВАТОРЫ ТВЕРДЕНИЯ АНГИДРИТА НА ОСНОВЕ ПРОДУКТОВ ТЕРМООБРАБОТКИ ГИПСА

Предлагается классификация активаторов твердения нерастворимого ангидрита, учитывающая ионный состав, тип поляризации молекул воды, величину pH и рСа суспензий нерастворимого ангидрита, позволяющая проектировать эффективные составы многокомпонентных активаторов. Рассматриваются активаторы твердения ангидрита на основе продуктов термообработки гипса.

Ключевые слова: ангидрит, активаторы твердения на основе продуктов термообработки гипса.

Нерастворимый ангидрит ( $\text{CaSO}_4$  II) в обычных условиях не гидратируется и не твердеет ввиду малой скорости растворения. Гидратация  $\text{CaSO}_4$  II характеризуется значительной продолжительностью во времени и отсутствием пересыщения. Для ускорения процесса гидратации необходимо нарушить координацию ионов кальция  $\text{Ca}^{2+}$  в его кристаллической решетке, что достигается введением активаторов твердения или тонким помолом  $\text{CaSO}_4$  II [1]. Активация твердения  $\text{CaSO}_4$  II с помощью химических добавок более распространена и имеет перспективу дальнейшего развития.

Исследованием действия добавок на твердение ангидритовых вяжущих, возможностей получения ангидритового вяжущего на базе природного и техногенного гипсового сырья, растворов и бетонов на его основе, механизма гидратации An II в разное время занимались такие видные ученые, как П.П. Будников, А.В. Волженский, В.Б. Ратинов, Х.-Б. Фишер, Т.Г. Габададзе, Я.А. Жвиронайте, В.А. Мартинайтис, Т.Х. Велтаури, М.Г. Алтыкис, Роланд, Риддель, Ю.Г. Мещеряков, О. Флерке, А. Кнауф и др.

Несмотря на обширные исследования в области активации  $\text{CaSO}_4$  II, до сих пор нет четких критериев подбора активаторов твердения  $\text{CaSO}_4$  II, они не систематизированы, до конца не выяснен механизм гидратации ангидрита, не изучено влияние генезиса исходного гипсового сырья на процессы активации  $\text{CaSO}_4$  II.

Особый интерес представляют активаторы твердения  $\text{CaSO}_4$  II на основе продуктов термообработки гипса, так как они содержат одноименные ионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ , являются центрами кристаллизации гипса и могут менять свои кислотно-основные свойства в зависимости от типа поляризации воды. Сведения о влиянии различных фаз сульфата кальция на свойства гипсовых вяжущих веществ противоречивы и также не систематизированы. В то же время вопросы определения оптимальных условий активации ангидрита, подбора комплексных многофункциональных активаторов, выяснения механизма гидратации  $\text{CaSO}_4$  II важны и актуальны для дальнейшего расширения области применения ангидритовых вяжущих. Интерес к данному виду вяжущих веществ со стороны отечественных и зарубежных строителей в последнее время постоянно возрастает.

Анализ литературных данных и результаты наших исследований позволили классифицировать активаторы твердения  $\text{CaSO}_4$  II. В зависимости от ионного состава и типа поляризации воды все активаторы твердения  $\text{CaSO}_4$  II предлагаются разделить на пять групп, каждая из которых, в свою очередь, имеет подгруппы:

**Первая группа — активаторы, содержащие ионы  $\text{SO}_4^{2-}$ :**

- кислоты Льюиса ( $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ,  $(\text{FeOH})_2\text{SO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ );
- кислоты Бренстеда ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{KHSO}_4$ ,  $\text{NaHSO}_4$ );
- вещества, слабо поляризующие воду ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

**Вторая группа — активаторы, содержащие ионы  $\text{Ca}^{2+}$ :**

- основания Льюиса ( $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{CaSiO}_3$ ,  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ , доменный шлак, портландцементный клинкер, обожженный доломит);
- основания Бренстеда ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{CaO}$ );
- вещества, слабо поляризующие воду ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ).

**Третья группа — активаторы, содержащие ионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ :**

- кислоты Льюиса ( $\beta\text{-CaSO}_4$  III,  $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\beta$ -обезвоженный полугидрат сульфата кальция);
- основания Льюиса (промежуточные высокоактивные фазы сульфата кальция);
- основания Бренстеда ( $\text{Ca}(\text{OH})_2\text{SO}_4$ );
- кислоты Бренстеда ( $\text{Ca}(\text{HSO}_4)_2$ );
- вещества, слабо поляризующие воду ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

**Четвертая группа — активаторы, не содержащие ионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ :**

- кислоты Льюиса ( $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{NiCl}_2$ );
- кислоты Бренстеда ( $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HCl}$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ );
- основания Льюиса ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{NaF}$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ );
- основания Бренстеда ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ,  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ );
- вещества, слабо поляризующие воду ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{KCl}$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{NaNO}_3$ ).

**Пятая группа — многокомпонентные активаторы:**

- многокомпонентные активаторы, содержащие ионы  $\text{SO}_4^{2-}$  в щелочной среде;
- многокомпонентные активаторы, содержащие ионы  $\text{Ca}^{2+}$  в кислой среде.

В представленной работе исследованы активаторы твердения  $\text{CaSO}_4$  II на основе продуктов термообработки гипсового сырья для получения вяжущих веществ и строительных материалов на их основе. По предложенной классификации эти вещества относятся к активаторам третьей группы.

**Научная гипотеза работы.** Двуводный гипс в момент образования обладает повышенной каталитической способностью по отношению к  $\text{CaSO}_4$  II. Причем его каталитическая активность зависит от фазового состава сульфата кальция. Различные модификации сульфата кальция имеют разные кристаллохимические и физические свойства и должны вести себя по-разному в смеси с  $\text{CaSO}_4$  II.

Основные исследования в работе выполнены на природном гипсе Шедокского месторождения с содержанием двуводного гипса — 92,7 мас. %. Нерастворимый ангидрит получали обжигом природного гипса в муфельной печи при 600 °C. Величина pH его суспензий равна 10,6. В качестве активаторов твердения  $\text{CaSO}_4$  II в работе использован  $\beta$ -растворимый ангидрит ( $\beta\text{-CaSO}_4$  III) и продукты термообработки гипса

( $\Gamma_x$ ), содержащие  $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  и  $\beta$ -обезвоженный полугидрат сульфата кальция, с количеством остаточной гидратной воды, мас. %: 0,7 ( $\Gamma_{0,7}$ ); 1,6 ( $\Gamma_{1,6}$ ); 3,5 ( $\Gamma_{3,5}$ ); 5,8 ( $\Gamma_{5,8}$ ). Обезвоживание гипса проводили в сушильном шкафу изотермически при температуре 160 °C. Фазовый состав сульфата кальция определяли по методике, предложенной Б.С. Бобровым [2]. Количество воды затворения для всех составов бралось одним и тем же и равнялось 40 %. Образцы твердели в течение 7 сут в паровоздушной среде. Физико-механические характеристики вяжущих изучались по стандартным методикам. Гипс и продукты его термообработки также исследовались с применением рентгенофазового метода анализа.

В результате проведенных исследований установлено, что прочностные характеристики ангидритовых вяжущих максимальны при количестве добавки  $\Gamma_x$  30 мас. %. Поэтому для изучения активирующей способности продуктов термообработки гипса в качестве базового выбран состав 30 мас. %  $\Gamma_x + 70$  мас. %  $\text{CaSO}_4$  II.

Самым активным по отношению к  $\text{CaSO}_4$  II является сульфат кальция, содержащий 3,5 мас. % гидратной воды (табл. 1). Он состоит из  $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  и  $\beta$ -обезвоженного полугидрата сульфата кальция в соотношении 1:1 и имеет состав  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,3\text{H}_2\text{O}$  ( $\Gamma_{3,5}$ ). Ангидритовое вяжущее с таким активатором имеет щелочную реакцию среды ( $\text{pH} = 10,1$ ). Продукты термообработки гипса с количеством остаточной гидратной воды > 3 мас. % содержат небольшие количества двуводного гипса. При количестве остаточной гидратной воды < 3 мас. % двуводный гипс в пробах отсутствует.

Таблица 1

**Характеристики ангидритовых вяжущих, активированных продуктами термообработки гипса, состава 30 мас. %  $\Gamma_x + 70$  мас. %  $\text{CaSO}_4$  II**

№ состава	Фаза сульфата кальция	$R_{cж}$ , 7 сут, МПа		Кр	Массовая доля		Величина показателя вязущих	
		сухие	водо- насыщенные		ДГ	An II	$K_g$	$K_i$
1	An III	24,0	11,4	0,475	66,0	26,7	0,253	0,320
2	$\Gamma_{0,7}$	33,0	17,2	0,521	66,0	26,7	0,047	0,218
3	$\Gamma_{1,6}$	29,5	16,5	0,560	57,9	34,8	0,025	0,122
4	$\Gamma_{3,5}$	38,0	17,0	0,447	81,7	11,0	0,266	0,340
5	$\Gamma_{5,8}$	35,0	15,2	0,434	74,0	18,7	0,207	0,320
6	$\Gamma_{9,9}$	20,0	8,5	0,425	65,0	27,7	0,067	0,145

Показатель совершенства структуры ( $K_g$ ) ангидритовых вяжущих, активированных продуктами термообработки сульфата кальция, вычисленный по результатам рентгенофазового анализа (табл. 2) как величина, получаемая делением разности площадей рефлексов при падении луча под углом 29,06° – 29,07° (3,074 Å) и 31,08° – 31,10° (2,876–2,888 Å) на их сумму [3], меньше  $K_g$  исходного природного гипса. Причем его величина зависит от количества остаточной гидратной воды у продуктов термообработки гипса. Показатель совершенства структуры характеризует дефектность кристаллической решетки дигидрата сульфата кальция.

Самое маленькое значение  $K_g = 0,025$  у ангидритового вяжущего, активированного сульфатом кальция состава  $\text{CaSO}_4 \cdot 0,123\text{H}_2\text{O}$  ( $\Gamma_{1,6}$ ). По отношению к ангидриту он имеет более низкую активирующую способность. Такое вяжущее характеризуется удлиненными сроками схватывания.

Таблица 2

**Рентгенофазовый анализ продуктов гидратации вяжущих состава:  
30 мас. % Гх + 70 мас. % CaSO<sub>4</sub> II**

2 Тета $\Theta$	Площадь пика	Приведенная интенсивность	Межплоскостное расстояние, Å	Полуширина рефлексов	%
30 мас. % Г <sub>180</sub> + 70 мас. % CaSO <sub>4</sub> II					
11,54	305	1213	7,661	0,24	100
20,66	278	1128	4,301	0,24	93,0
23,30	61	224	3,818	0,26	18,5
29,06	240	864	3,074	0,27	71,2
31,09	143	472	2,880	0,29	38,9
33,32	88	312	2,690	0,27	25,7
30 мас. % Г <sub>0,7</sub> + 70 мас. % CaSO <sub>4</sub> II					
11,54	272	1104	7,661	0,19	100
20,64	313	1091	4,301	0,28	93,8
23,31	58	197	3,809	0,28	17,8
29,06	221	843	3,074	0,25	76,4
31,10	201	461	2,880	0,49	41,9
33,31	87	320	2,690	0,26	29,0
30 мас. % Г <sub>1,6</sub> + 70 мас. % CaSO <sub>4</sub> II					
11,54	234	971	7,661	0,23	96,6
20,65	253	1005	4,301	0,24	100,0
23,31	47	165	3,818	0,27	16,4
29,06	199	717	3,074	0,27	71,3
31,10	198	429	2,880	0,44	42,7
33,30	76	296	2,690	0,25	29,5
30 мас. % Г <sub>3,5</sub> + 70 мас. % CaSO <sub>4</sub> II					
11,54	331	1243	7,661	0,26	100
20,66	331	1243	4,301	0,26	100
23,33	55	229	3,809	0,24	18,4
29,07	281	944	3,074	0,28	75,9
31,08	163	555	2,880	0,28	44,7
33,32	120	408	2,690	0,28	32,8
30 мас. % Г <sub>5,8</sub> + 70 мас. % CaSO <sub>4</sub> II					
11,55	283	1104	7,661	0,25	90,2
20,67	313	1224	4,301	0,25	100
23,33	67	179	3,809	0,36	14,6
29,07	245	901	3,074	0,24	73,6
31,10	161	512	2,876	0,30	41,8
33,33	98	347	2,687	0,27	28,3

Примечание. Вся шкала 1307 имп.

ния, меньшей прочностью и содержит около 35 мас. % негидратированного CaSO<sub>4</sub> II.

Самое большое значение  $K_g = 0,266$  имеет ангидрит, активированный сульфатом кальция состава CaSO<sub>4</sub> · 0,3H<sub>2</sub>O (Г<sub>3,5</sub>). Количество негидратированного CaSO<sub>4</sub> II в нем минимально и составляет 11 мас. %, а количе-

ство  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  максимально — 81,7 мас. %. Прочность вяжущего также максимальна. Высокая активность двуводного гипса, получаемого гидратацией сульфата кальция, содержащего 3,5 мас. % гидратной воды, подтверждается низким значением  $K_g$  (табл. 3). Этот продукт имеет нейтральную или слабокислую реакцию среды, большую интенсивность и площадь основных рефлексов двуводного гипса на рентгенограммах (табл. 4). Структура затвердевшего материала мелкокристаллическая ( $K_i = 0,26$ ) [3].

Таблица 3  
Характеристики продуктов термообработки гипса

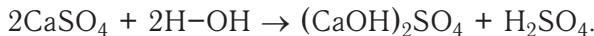
Количество гидратной воды, %	Параметры обжига			$R_{\text{сж}}, 7$ сут, МПа	Величина показателя вяжущих	
	температура, °C	масса, г	время ч·мин		$K_g$	$K_i$
<b>19,40</b>	—	—	—	—	0,54	0,48
7,6	160	100	1·40	20,0	0,46	0,46
4,60	160	100	2	22,0	0,33	0,36
3,50	160	100	2·45	31,5	0,17	0,26
2,80	160	100	3	27,0	0,39	0,40
1,07	160	100	5	31,0	0,39	0,43

При соприкосновении с водой продукты термообработки двуводного гипса по-разному поляризуют молекулы воды, изменяя кислотность среды. Можно выделить два типа поляризации молекул воды [4]. Если поляризация воды происходит за счет свободных орбиталей иона  $\text{Ca}^{2+}$ , образующихся при неполном разрыве водородных связей, то суспензия вяжущего подкисляется. В случае поляризации воды ионами  $\text{SO}_4^{2-}$ , образующимися при полном разрыве водородных связей, суспензии вяжущего приобретают щелочную среду.

Устойчивые фазы сульфата кальция поляризуют воду за счет неподеленных электронных пар групп  $\text{SO}_4^{2-}$ , с отрывом ионов  $\text{H}^+$  по схеме:



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



В первом случае в суспензиях уменьшается концентрация ионов  $\text{SO}_4^{2-}$ , а во втором — ионов  $\text{Ca}^{2+}$  за счет образования слабых электролитов.

Причем активаторы, являющиеся донорами электронных пар, должны содержать избыток ионов  $\text{SO}_4^{2-}$  и щелочную среду, а активаторы, являющиеся акцепторами электронных пар, — избыток ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и кислую среду. Оптимальные условия гидратации  $\text{CaSO}_4$  II наблюдаются в присутствии активаторов, увеличивающих его растворимость, но не выше растворимости двуводного гипса в воде. Для формирования структуры двуводного гипса из нерастворимого ангидрита более предпочтительна поляризация воды по второму типу за счет свободных орбиталей ионов  $\text{Ca}^{2+}$  с отрывом от воды ионов  $\text{OH}^-$ .

Двуводный гипс, образующийся при гидратации продуктов термообработки сульфата кальция, с одной стороны, выступает в качестве центров кристаллизации новообразованного гипса. С другой стороны, изме-

Таблица 4

**Рентгенофазовый анализ продуктов гидратации сульфата кальция с различным содержанием гидратной воды**

2 Тета Θ	Площадь пика	Приведенная интенсивность	Межплоскостное расстояние, Å	Полуширина рефлексов	%
Природный гипс					
11,45	721	2117	7,728	0,33	100
20,54	281	776	4,322	0,35	36,7
23,19	124	349	3,834	0,34	16,5
28,92	332	835	3,089	0,38	39,4
30,90	98	267	2,894	0,35	12,6
33,15	88	224	2,702	0,38	10,6
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,62\text{H}_2\text{O}$ (7,60 мас. % гидратной воды)					
11,54	586	1720	7,694	0,33	100
20,56	341	904	4,322	0,36	52,6
23,23	101	293	3,826	0,33	17,0
28,96	341	835	3,084	0,39	48,5
31,93	126	331	2,889	0,37	19,2
33,19	95	229	2,698	0,40	13,3
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,36\text{H}_2\text{O}$ (4,60 мас. % гидратной воды)					
11,47	431	1163	7,694	0,36	100
20,57	336	867	4,322	0,37	74,5
23,23	79	221	3,834	0,34	19,0
28,97	316	795	3,084	0,38	68,4
30,95	159	416	2,889	0,44	35,8
33,19	126	301	2,698	0,40	25,9
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,3\text{H}_2\text{O}$ (3,50 мас. % гидратной воды)					
11,50	597	1813	7,661	0,32	100,0
20,60	673	1693	4,301	0,38	93,4
23,25	114	341	3,818	0,32	18,8
29,00	738	1568	3,074	0,45	86,5
31,00	333	883	2,880	0,38	48,7
33,25	254	592	2,690	0,41	32,7
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,22\text{H}_2\text{O}$ (2,80 мас. % гидратной воды)					
11,46	462	1245	7,728	0,36	100
20,55	341	904	4,322	0,36	72,6
23,20	74	203	3,834	0,35	16,3
28,94	338	837	3,084	0,39	67,2
30,93	146	357	2,889	0,45	28,7
33,18	108	267	2,698	0,39	21,4
$\text{CaSO}_4 \cdot 0,08\text{H}_2\text{O}$ (1,07 мас. % гидратной воды)					
11,46	396	1064	7,694	0,36	100
20,57	352	920	4,322	0,37	86,5
23,20	71	187	3,834	0,37	17,6
28,95	320	784	3,084	0,47	73,7
30,94	140	357	2,889	0,38	33,6
33,18	105	261	2,698	0,39	24,5

Примечание. Вся шкала 2179 имп.

няя концентрацию ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  в вяжущих системах, — влияет на растворимость  $\text{CaSO}_4$  II.

Повышенную каталитическую активность продуктов термообработки гипса с количеством остаточной гидратной воды 3,5 мас. % можно объяснить условиями его гидратации. Ангидритовое вяжущее с таким активатором представляет собой трехфазную систему, состоящую из  $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\beta$ -обезвоженного полугидрата сульфата кальция и  $\text{CaSO}_4$  II. При контакте с водой  $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  быстро гидратируется до двуводного гипса. Переход  $\beta$ -обезвоженного полугидрата сульфата кальция в двуводный гипс проходит через образование  $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ , что подтверждается наличием двух максимумов на кинетических зависимостях рСа. Двуводный гипс, образующийся при гидратации  $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ , имеет низкую растворимость (2,05 г/л) и быстро формирует центры кристаллизации. Фазы сульфата кальция —  $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\beta$ -обезвоженного полугидрата сульфата кальция и  $\text{CaSO}_4$  III, имеющие более высокую растворимость (6,37–7,4 г/л), чем двуводный гипс, насыщают раствор ионами  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ . Произведение концентраций ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  становится  $> \text{ПР}_{(\text{CaSO}_4)} = 2,5 \cdot 10^{-5}$  и сульфат кальция кристаллизуется. Этот процесс увеличивает скорость растворения и гидратации  $\text{CaSO}_4$  II.

Меньшую прочность имеет нерастворимый ангидрит, активированный  $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\beta$ -обезвоженного полугидрата сульфата кальция и  $\beta\text{-CaSO}_4$  III. В первом случае, в системе образуется много центров кристаллизации, но не достаточна концентрация ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  из-за низкой растворимости двуводного гипса. Во втором случае в системе наблюдается высокая концентрация ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ , но отсутствует достаточно большое количество центров кристаллизации.

Таким образом, лучшим активатором нерастворимого ангидрита, позволяющим получить ангидритовое вяжущее с механической прочностью на сжатие 35–40 МПа, является продукт термообработки природного гипса с количеством остаточной гидратной воды 3,5 мас. %. За счет особенностей фазового состава, выражющихся в формировании на начальном этапе гидратации трехфазовой системы, состоящей из  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,  $\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CaSO}_4$  II, и поляризации воды с отрывом ионов  $\text{OH}^-$ , он обеспечивает оптимальные условия растворения и гидратации нерастворимого ангидрита и кристаллизации  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Полученное ангидритовое вяжущее рекомендуется использовать при получении сухих смесей и строительных материалов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Суликова, Е.В. Вопросы твердения ангидритового вяжущего [Текст] / Е.В. Суликова, М.А. Лапидус, М.С. Гаркави, А.В. Долженков // Стройт. материалы. — 1993. — № 7. — С. 25–26.
- Бобров, Б.С. Определение фазового состава строительного и высокопрочного гипса [Текст] / Б.С. Бобров, Л.В. Киселева, И.Г. Жигулев, А.В. Романова // Стройт. материалы. — 1983. — № 7. — С. 23–24.
- Клименко, В.Г. Рентгенофазовый анализ гипсового сырья различного генезиса и продуктов его термообработки [Текст] / В.Г. Клименко, А.В. Балахонов // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 10. — С. 26–31.
- Клименко, В.Г. Влияние температурно-временных условий дегидратации природного гипса на его свойства [Текст] / В.Г. Клименко, А.С. Погорелова // Изв. вузов. Строительство. — 2005. — № 6. — С. 29–33.

Получено после доработки 09.06.10

**Klimenko V.G.**, candidate of technical sciences, assistant professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

## **ANHYDRITE SOLIDIFICATION ACTIVATING AGENT BASED ON PLASTER PREBAKING PRODUCTS**

The author proposes insoluble anhydrite solidification activating agents classification taking into account ionic composition, water molecules polarization type, pH and pCa volume of insoluble anhydrite suspensions allowing to project effective composition of multicomponent activating agent. The author considers anhydrite solidification activating agents based on plaster prebaking products.

**Key words:** anhydrite, solidification activating agents based on plaster prebaking products.

### **REFERENCES**

1. Sulimova, E.V. Issues of solidification of anhydrite concreting [Text] / E.V. Sulimova, M.A. Lapidus, M.S. Garkavi, A.V. Dolzhenkov // Building materials. — 1993. — N 7. — P. 25–26.
2. Bobrov, B.S. Determination of cement and hi-impact plaster phase composition [Text] / B.S. Bobrov, L.V. Kiseleva, I.G. Zhigulin, A.V. Romanova // Building materials. — 1983. — N 7. — P. 23–24.
3. Klimenko, V.G. X-ray phase analysis of plaster raw materials of various nature and its prebaking products [Text] / V.G. Klimenko, A.V. Balakhonov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 10. — P. 26–31.
4. Klimenko, V.G. Influence of time and temperature condition of gypsum dehydratation on its properties [Text] / V.G. Klimenko, A.S. Pogorelova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2005. — N 6. — P. 29–33.

УДК 666.971.022.7:538-143

Г.А. ФОКИН, О.В. ФОЛИМАГИНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ  
ВИХРЕДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА СВОЙСТВА ВОДЫ  
ЗАТВОРЕНИЯ И ГИПСОВОГО ТЕСТА**

Теоретически обоснована эффективность использования вихревых и динамических полей для активации воды затворения и раствора гипса. Проанализированы результаты исследований изменения свойств раствора гипса, а также прочности композитов, изготовленных с применением указанного метода.

Ключевые слова: вода, активация, вихрединамическое поле, строительные материалы.

Строительный гипс довольно широко применяют как компонент растворов для штукатурных работ, для изготовления плит, перегородок, искусственного мрамора, декоративных изделий. Часто для улучшения свойств конечного продукта при производстве в гипсовое тесто добавляют различные химические реагенты.

При использовании активации воды затворения и гипсовых суспензий различными физическими воздействиями уменьшается или полностью исключается расход химических реагентов, снижается загрязненность растворов, повышается качество целевых продуктов. Иными словами, активацию можно использовать для создания высокоеффективных и экологически чистых материалов в строительной отрасли.

В настоящее время существует довольно много способов активации воды и водных растворов. Суть большинства из них заключается в том, что вода и водные растворы являются нелинейными самоорганизующимися системами, которые структурно перестраиваются (переструктурируются) при различных физических воздействиях. К ним относятся кавитация, звуковые и ультразвуковые волны, монохроматическое излучение, высоковольтный разряд, закрутка столба водного раствора и др.

Цель данного исследования — экспериментальное подтверждение влияния на воду затворения и гипсовое тесто вихрединамического поля (ВДП), а также теоретическое обоснование наблюдаемых после обработки эффектов.

Под вихрединамическим воздействием понимается ударное воздействие в переменном магнитном поле.

Для осуществления необходимых операций по активации и изучению свойств активированной воды и растворов была создана комплексная установка, включающая аппарат для активации, компьютер, АЦП, набор датчиков (электропроводности, pH, температуры и т.д.).

Для активации используется магнитное поле с индукцией  $\sim 1$  Тл, диапазон изменения частоты вращения ротора рабочего механизма 200–11 000 об/мин.

В работе [1] показано, что в простейших случаях методы управления энергией многоатомной молекулы, осуществляемого внешним электромагнитным полем, имеют наглядные механические аналогии, связанные с внесением в систему дополнительных сил, которые могут интерпретироваться как упругие и диссипативные силы с противоположным знаком.

Внесение таких сил в консервативную систему, как правило, приводит к неустойчивости, с чем и связана реализация управления, приводящая к росту энергии системы. А это в свою очередь влечет за собой изменение физико-химических процессов, протекающих в системе. В данном случае рассматриваемой системой является гипсовое тесто и вода затворения.

В основе процессов, обусловливающих твердение гипсовых вяжущих, лежит способность этих веществ при взаимодействии с водой образовывать пересыщенные растворы. Проведенные исследования растворимости кальция в обычной водопроводной воде и воде, обработанной ВДП, показали, что в зависимости от времени обработки растворимость его возросла на 10–20 %. Следовательно, в гипсовой суспензии, приготовленной на основе активированной воды, разность содержания ионов  $\text{Ca}^{2+}$  у поверхности кристаллов полуводного гипса и содержания этих ионов в остальном объеме больше, чем в суспензии, приготовленной с использованием обычной воды. С увеличением градиента концентрации ионов  $\text{Ca}^{2+}$  после обработки ВДП растет скорость диффузии этих ионов в раствор и даже крупные кристаллы полугидрата сульфата кальция растворяются более полно.

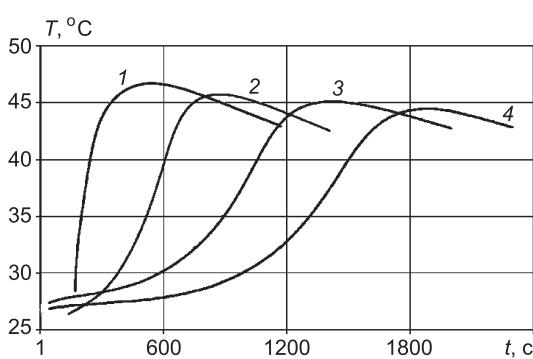


Рис. 1. Температурные кривые, полученные при твердении гипсового теста

1 — в течение 3 мин активированного ВДП; 2 — в течение 1,5 мин активированного ВДП; 3 — изготовленного с использованием воды, в течение 60 мин активированной ВДП; 4 — изготовленного с использованием обычной воды

30 мин. Так, при 1,5 мин его обработки время кристаллизации сокращается почти на треть. Существенно и то, что изменяется пиковое значение температуры. Все это характеризует активность структурообразования, одним из важных этапов которого является процесс гидратации. Его интенсивность можно оценить, исследуя процесс тепловыделения. Рассчитаем степень гидратации  $H$

$$H = \frac{T_t - T}{T_t - T_{\max}} \cdot 100 \%,$$

где  $T_t$  — термостатируемая температура;

$T_{\max}$  — максимум температуры теплового потока.

Как видно из рис. 1 и данной формулы, активация воды и растворов приводит к значительной интенсификации процесса гидратации.

Смещение максимума температуры тепловыделения в область более высоких температур говорит о том, что большее количество полуводного гипса вступает в реакцию гидратации (увеличивается глубина гидратации). Значит, воздействие ВДП на воду затворения и гипсовое тесто обладает упрочняющим действием на структуру продуктов твердения гипсовых смесей.

На рис. 1 представлены результаты изучения кинетики тепловыделения в процессе твердения полуводного гипса при обработке воды и гипсового теста вихрединамическим полем.

Применение персонального компьютера и соответствующего программного обеспечения позволило определить с большой точностью конец кристаллизации, что соответствует возрастанию температуры до максимального значения. Время обработки воды и раствора влияет на продолжительность процесса твердения гипса, которое изменяется от 8 до

Испытание гипсовых образцов на сжатие при одном и том же водогипсовом отношении и температуре воды затворения показало, что смещение кривых вправо сопровождается уменьшением прочности.

На ранней стадии гидратации после обработки воды или гипсовой суспензии ВДП увеличивается количество зародышей новой фазы по следующей схеме. Согласно [2], зародыши новой фазы — центры кристаллизации — возникают в результате флуктуации плотности. Вероятность возникновения зародышей новой фазы в единице объема за единицу времени  $\alpha$  зависит от величины энергии активации  $\Delta E_a$  и описывается известной формулой

$$\alpha = A \exp \left\{ -\frac{\Delta E_a}{RT} \right\},$$

которая после соответствующих преобразований приводится к виду

$$\alpha = A \exp \left\{ -\frac{4\gamma V^2 \sigma^3}{(RT)^2 \ln(\Pi\pi / \Pi\rho)} \right\},$$

где  $A$  — предэкспоненциальный множитель, влияющий на энергию активации процесса;

$\gamma$  — коэффициент формы частицы;

$V$  — молекулярный объем;

$\sigma$  — свободная поверхностная энергия (межфазовая энергия);

$R$  — универсальная газовая постоянная;

$\Pi\pi$  — произведение пересыщения, т.е. произведение активностей имеющихся в растворе ионов;

$\Pi\rho$  — равновесное с гидратами произведение активностей ионов.

Возникновение зародышей кристаллизации — энергетически невыгодный процесс по сравнению с ростом кристаллов. Его протекание существенно облегчается наличием границ раздела фаз. Отмечено, что при взаимодействии с водой кристаллы полуводного гипса частично слипаются, не успев прореагировать. Следовательно, в получаемом гипсовом тесте содержится некоторое количество скоплений частиц [3]. Мелкие частицы вяжущего, не прореагировавшие с водой, остаются как бы упакованными в затвердевшем гипсе. Обработка гипсовой суспензии ВДП способствует разрушению скоплений гипса на более мелкие составляющие, что повышает эффективность его использования за счет увеличения поверхности раздела фаз.

При фазовых превращениях в конденсированных фазах время жизни критического зародыша определяется числом молекул на его поверхности, частотой их колебаний и энергетическим барьером пристраивания новой молекулы к поверхности зародыша [4].

Введение энергии при воздействии ВДП обусловливает снижение высоты энергетического барьера за счет сообщения активным группировкам поверхности дополнительной энергии. При воздействии магнитного поля изменяется собственная частота колебаний молекул.

Таким образом, структурообразующая роль воздействия ВДП при возникновении зародышей новой фазы может быть объяснена тем, что переменное магнитное поле облегчает работу образования зародышей, в том числе и за счет увеличения поверхности раздела фаз.

Одна из особенностей твердения гипса — активизация процесса рекристаллизации структуры при завершении процесса кристаллизации [3]. Детальное изучение температурных кривых показало, что после завершения кристаллизации начинают четко проявляться области температурных трансляций длительностью порядка 3 с, частота которых растет со временем. Они носят импульсный характер (рис. 2).

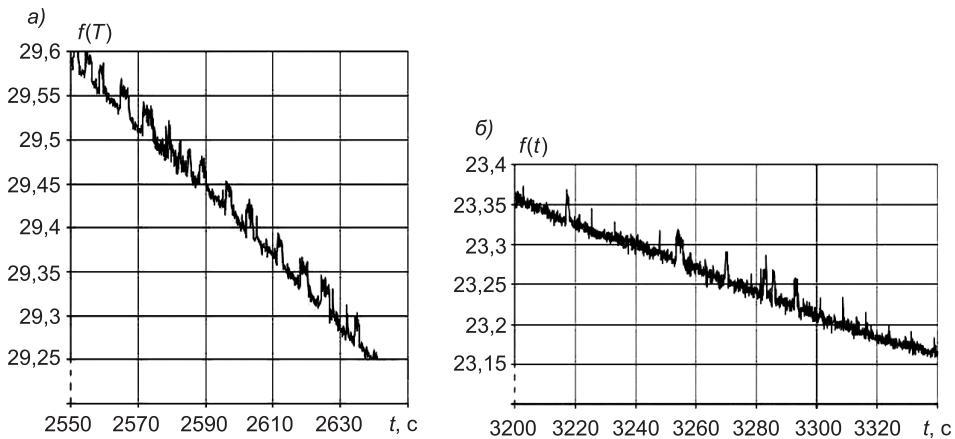


Рис. 2. Участки температурных кривых, полученных при твердении гипсового теста на основе активированной (а) и водопроводной воды (б)

Очевидно, это обусловлено активацией процесса рекристаллизации, сопровождающегося выделением энергии. Несмотря на усиленное дефектообразование прочность гипсовых образцов на основе активированной воды больше, чем у контрольных образцов. Объясняется это тем, что вследствие разрушения части кристаллов микроструктура становится более плотной и тонкопористой, а соответственно повышается прочность материала.

Визуальное наблюдение за ростом кристаллов (рис. 3) подтвердило выводы об улучшении структуры материала. Количество кристаллов  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  при затворении активированной водой увеличилось. Приведенная фотография свидетельствует о резком увеличении кристаллических сростков на единицу поверхности. За тот же промежуток времени в обычной водопроводной воде наблюдаются новообразования со значительно меньшим количеством кристаллизационных контактов.

Также большое значение имеет то, что в обработанной ВДП воде образуются более крупные кристаллы двуводного гипса.

Одновременно с кристаллизацией новообразований происходит перекристаллизация за счет большей растворимости мелких кристалликов по сравнению с крупными того же химического состава и модификации. Процесс перекристаллизации неизбежен, так как мелкие кристаллы, обладая избытком свободной поверхностной энергии, стремятся к укрупнению за счет этой энергии. Процесс перекристаллизации снижает прочность материала, может затормозить уплотнение смеси. То есть структура, изначально состоящая из крупных кристаллов, более выгодна.

Результаты испытаний показали, что прочность на сжатие гипсовых образцов на активированной воде по сравнению с контрольными возрастает на 5–30 % в зависимости от времени воздействия на воду затворения ВДП и водогипсового отношения. А при активации ВДП гипсового теста прочность образцов растет до полутора раз.

Анализ полученных экспериментальных результатов позволяет сделать вывод, что при воздействии ВДП на воду в ней происходят локальные изменения среды, сопровождающиеся повышением и понижением температуры в отдельных микрообъемах. Подобные изменения вызывают распространение в жидкости температурных волн. Это сопровождается флюктуациями макроскопических параметров: энергии, температуры, плотности, распределения концентрации частиц. Флюктуации тесно связаны с термодинамическими свойствами жидкости, они влияют на кинетику мо-

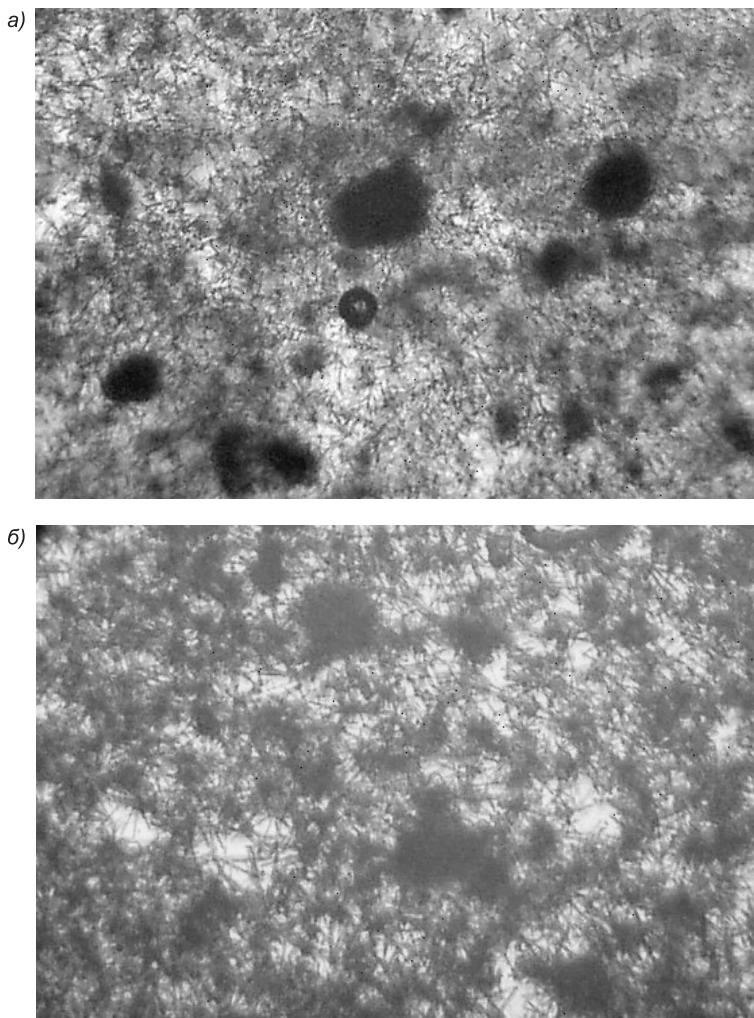


Рис. 3. Образование кристаллов двуводного гипса (а) без и при активации воды затворения ВДП (б). Увеличение  $\times 150$

лекулярных процессов, например, на процессы диффузии, которые играют основную роль при твердении систем на основе минеральных вяжущих<sup>1</sup>.

Избыток сообщенной энергии изменяет колебательное движение сложной молекулы, ассоциата, комплекса, перераспределяется по степеням свободы внутримолекулярных колебаний, спонтанно переходит в кинетическую энергию трансляционного движения молекул жидкости. В результате происходит локальный разогрев жидкости с образованием температурных волн и изобарических флуктуаций плотности.

Процессы, сопровождающие эти явления, носят квантовый характер. При воздействии ВДП на воду и растворы проявляется эффект Зеемана, обусловленный тем, что в присутствии магнитного поля атом приобретает дополнительную энергию  $\Delta E = -\vec{\mu} \vec{B}$ , пропорциональную его магнитному моменту  $\vec{\mu}$ . Приобретенная энергия приводит к снятию вырождения атомных состояний по магнитному квантовому числу  $m_j$  (т.е. ориентационного вырождения) и расщеплению атомных линий. Хотя вода макроскопически

<sup>1</sup> Киттель Ч. Элементарная статистическая физика / Пер. с англ. Л.А. Шубина; ред. С.В. Вонсовский. М.: Изд-во иностр. лит., 1960. 278 с.

очень слабый диамагнетик, на микроуровне она имеет ненулевые магнитные моменты, так как ионы кислорода обладают магнитным моментом ( $M$ ) в гексагональных кольцах водной структуры. Также магнитным моментом обладают ионные ассоциаты, образовавшиеся в результате уменьшения гидратации ионов под воздействием магнитного поля.

Кольцевые структуры из молекул воды, где только один протон каждой молекулы  $H_2O$  участвует в формировании водородной связи, оказываются более стабильными, чем образованные молекулами воды другие структуры. Замкнутые водородными связями кольца из молекул воды, равновероятно ориентируясь вдоль и против направления магнитного поля  $H$ , могут изменить колебательную энергию своих поперечных колебаний на величину  $\Delta\epsilon^H = \pm \hbar |\Delta\nu| = MH$ , где  $\hbar$  — постоянная Планка;  $M$  — магнитный момент кольца;  $H$  — внешнее магнитное поле. Отсюда при напряженности слабого магнитного поля  $H = 5 \cdot 10^{-3}$  Тл получается значение магнитного момента  $M \approx 10^{-23}$  Дж/Тл. Эта величина имеет порядок магнетона Бора. На рис. 4 изображено хаотическое (а) и упорядоченное (б) расположение гексагональных колец водной среды без поля и в магнитном поле<sup>2</sup>.

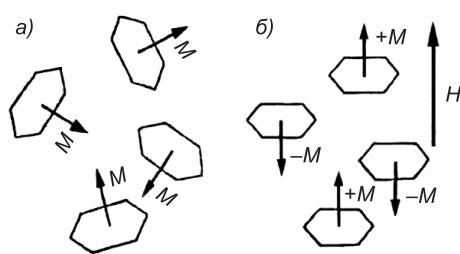


Рис. 4. Молекулярная структура воды  
а — хаотическая без поля; б — упорядоченная в магнитном поле

степенями свободы. Далее происходит диссипация этой энергии в тепловую за счет межмолекулярного взаимодействия.

Водородная связь не накладывает жестких ограничений на геометрию системы из молекул воды, поэтому потенциал, в котором находится протон, обеспечивающий водородную связь, может принимать различную форму. В некоторых случаях уровни энергии протона расщепляются. Величина расщепления уровней тесно связана с частотой туннелирования протона и при определенных условиях может находиться в миллиметровой области спектра.

Энергия ближних взаимодействий молекул воды, проявляющаяся при их вращении относительно собственных осей и другой частицы, определяет общую конформационную энергию сетки водородных связей. Природа этих взаимодействий связана как с отталкиванием атомов, у которых перекрываются электронные оболочки, так и с ван-дер-ваальсовыми силами. Вследствие этих сил появляется энергетический потенциал внутреннего вращения молекул воды. В зависимости от расположения соседних молекул воды, а также от типа частицы, вокруг которой молекула воды вращается, значение этого потенциала изменяется. Поэтому различные повороты молекул  $H_2O$  дают индивидуальный вклад в конформационную энергию всей сетки водородных связей и при определенных условиях они могут быть восприимчивы к воздействию ВДП.

Таким образом, под воздействием ВДП структуры из молекул  $H_2O$  и ионные ассоциаты могут ориентироваться под его воздействием при общем нулевом суммарном магнитном моменте молекул воды. Это способно упорядочить структуру всей обрабатываемой воды.

При воздействии вихревых полей на воду при традиционном рассмотрении их энергия трансформируется в кинетическую энергию полярных молекул, связанную с вращательными

<sup>2</sup> Хахалин А.В. Влияние низкоинтенсивного электромагнитного поля на водные кластеры в присутствии ионов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2006. 140 с.

Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о влиянии активирования ВДП воды затворения и растворов на кинетику физико-химических процессов, протекающих при структурообразовании. Под воздействием ВДП вода приобретает некоторый запас внутренней энергии, которая впоследствии изменяет кинетику сложных химических процессов. Такие изменения приводят к повышению прочности строительных материалов.

Кроме того у вихренического метода есть ряд преимуществ: экологическая чистота; простота реализации; малая энергоемкость. Все это позволяет говорить о целесообразности его применения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иванова, Е.А. Управление энергией многоатомной молекулы [Текст] / Е.А. Иванова, А.М. Кривцов // Управление в физико-технических системах. — СПб. : Наука, 2004.
2. Ратинов, В.Б. О механизме гидратации при твердении минеральных вяжущих веществ [Текст] / В.Б. Ратинов, Т.И. Розенберг, Г.Д. Кучерева // Гидратация и твердение вяжущих. — Львов, 1981. — С. 78–84.
3. Фокин, Г.А. Акустика в строительстве [Текст] / Г.А. Фокин, В.А. Смирнов. — Пенза : ПГУАС, 2006. — 360 с.
4. Коллоидная химия [Текст] : учеб. для университетов и химико-технолог. вузов / Е.Д. Щукин, А.В. Перцов, Е.А. Амелина. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Выш. шк., 2004. — 445 с.: ил.

*ФОКИН Г.А., д-р техн. наук, проф.*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства  
ФОЛИМАГИНА О.В., асп.; E-mail: folim1@mail.ru*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

Получено после доработки 21.03.11

**Fokin G.A.**, doctor of technical sciences, professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

**Folimagina O.V.**, post-graduate student; E-mail: folim1@mail.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

#### **RESEARCH OF VORTICAL AND DYNAMIC FIELDS INFLUENCE ON PROPERTIES OF MIXING WATER AND GYPSUM PLASTER**

Efficiency of use of vortical and dynamic field for activation of mixing water and gypsum plaster is reasonable theoretically. The results of researches of property's change of gypsum plaster, and also durability of materials with application of the specified method are analyzed.

**Key words:** water, activation, vortical and dynamic field, building materials.

#### REFERENCES

1. Ivanova, E.A. Energy management of a multinuclear molecule [Text] / E.A. Ivanova, A.M. Krivtsov // Management in physical and technical systems. — SPb. : Science, 2004.
2. Ratinov, V.B. About the hydration reaction mechanism at mineral binding material maturing [Text] / V.B. Ratinov, T.I. Rozenberg, G.D. Kuchereeva // Hydration reaction and maturing of binding material. — Lvov, 1981. — P. 78–84.
3. Fokin, G.A. Acoustics in construction [Text] / G.A. Fokin, V.A. Smirnov. — Penza : Penza State University of Architecture and Construction, 2006. — 360 p.
4. Colloidal chemistry [Text] : textbook for university and chemical engineering institute of higher education / E.D. Shhukin, A.V. Percov, E.A. Amelina. — Third edition., revised and enlarged. — M. : Higher school, 2004. — 445 p.

**УДК 691.175.5 : 620.18**

**Т.А. НИЗИНА, П.А. КИСЛЯКОВ, А.Н. ЗИМИН, Д.Р. НИЗИН**

## **«КРИТИЧЕСКАЯ» МИКРОТВЕРДОСТЬ КАК КРИТЕРИЙ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Экспериментально исследован и проведен анализ распределения микротвердости эпоксидных композитов, модифицированных водорастворимыми аддуктами нанокластеров углерода. Для изучения распределения свойств полимерных материалов использовался склерометрический метод исследования микротвердости с применением программного комплекса «Идентификация и анализ пористости строительных материалов». Предложен критерий оценки эффективности модификаторов для структурно-неоднородных материалов на основе изменения «критической» микротвердости, определенной по методу «островов среза».

**Ключевые слова:** наномодифицированный эпоксидный композит, склерометрический метод исследования, микротвердость, структурная неоднородность, дефектная зона.

В последние годы в области строительного материаловедения намечается тенденция активного внедрения наночастиц различного вида для модификации свойств строительных материалов. Многочисленные публикации в научной периодике свидетельствуют о создании композитов, обладающих улучшенными эксплуатационными характеристиками при введении в их состав наномодификаторов в «гомеопатических» количествах.

Результаты проведенных экспериментальных исследований подтверждают, что наномодификация строительных материалов приводит к существенному изменению их свойств. На наш взгляд, наибольший интерес в данном случае представляют исследования изменения не только интегральных характеристик, но и анализ распределения свойств материалов по объему композитов.

В качестве объекта исследования использовались эпоксидные композиты, наномодифицированные разработанными в ООО НТЦ «Прикладных нанотехнологий» 6 видами аддуктов нанокластеров углерода (АНКУ). Используемые модификаторы представляют собой новые функционализированные углеродные соединения, обладающие высокой растворимостью в полярных растворителях, что значительно упрощает их использование, позволяя отказаться от применения дополнительной ультразвуковой обработки.

Исследования проводились на эпоксидном связующем ЭД-20, отверждающем комплексом отвердителей аминного и аминофенольного типа — ПЭПА и АФ-2. Для введения в состав композитов наночастиц применялся пищевой этиловый спирт. Концентрация АНКУ составляла 0,01, 0,02 и 0,03 % от массы связующего.

Для изучения распределения свойств наномодифицированных эпоксидных композитов использовался склерометрический метод исследования микротвердости. Суть склерометрического метода заключается в на-

несении царапины на поверхность полимерного композита, измерении ее ширины и расчете значений микротвердости. Ширину канавки согласно ГОСТ 21318–75 измеряют с помощью винтового окулярного микрометра. Выполнение подобных измерений, особенно при проведении многочисленных исследований, всегда связано с трудоемкостью и определенной субъективностью (в силу различия зрения исследователей) измерений. Учитывая структурную неоднородность большинства строительных материалов, исследователи вынуждены проводить дополнительные эксперименты, что еще больше усложняет и удлиняет проведение склерометрических исследований.

Значительно упростить и ускорить методику обработки результатов эксперимента, особенно в разделе наиболее трудоемкой ее части — измерении ширины царапин, возможно при использовании программного комплекса «Идентификация и анализ пористости строительных материалов» [1]. Учитывая, что царапины при сканировании распознаются программным комплексом как отдельные поры, дальнейшая обработка результатов не представляет затруднений. Методика проведения исследований приведена [2]. Нагрузка на индентор составляла 0,5 Н.

Результаты проведенных исследований, представленные в виде кривых плотности распределений и средних арифметических после статистической обработки, приведены на рис. 1, 2. Установлено, что введение с 1-го по 5-й вид АНКУ приводит к значительному повышению свойств. Так, при содержании данных наночастиц в количестве 0,01 % от массы связующего значения микротвердости повышаются до 11–12 МПа, что в среднем в 2 раза превышает показатели контрольного состава (см. рис. 1).

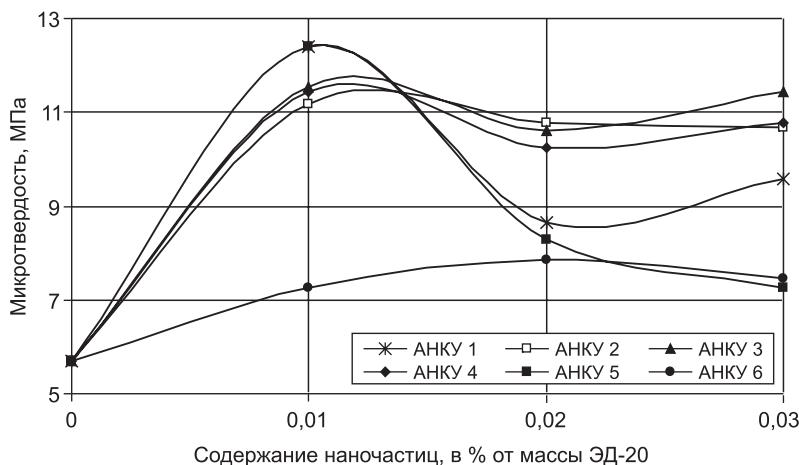
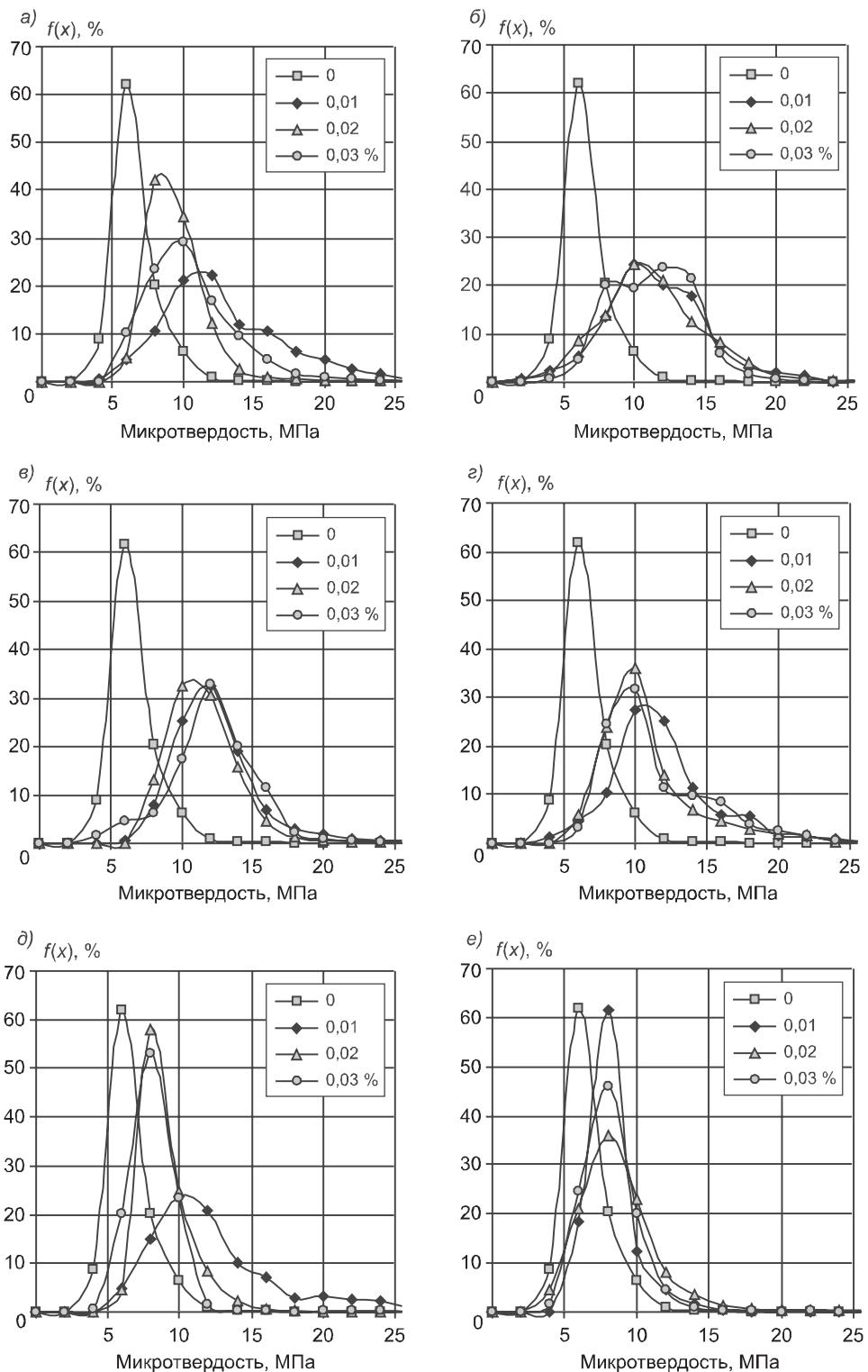


Рис. 1. Изменение значений микротвердости эпоксидных композитов от вида и содержания наномодификаторов АНКУ

Из кривых распределения микротвердости видно (см. рис. 2), что при введении в эпоксидные композиты наномодификаторов происходит расширение диапазона значений микротвердости. Для составов, модифицированных наночастицами 2, 3 и 6-го видов, кривые распределения достигают своего максимума практически при одних и тех же значениях микротвердости для всех исследуемых концентраций АНКУ (см. рис. 2, б, в, е).

Расширение диапазона кривых распределения вправую сторону свидетельствует о формировании в объеме наномодифицированных компози-



*Рис. 2. Плотность распределения микротвердости наномодифицированных эпоксидных композитов*

Содержание АНКУ от массы эпоксидной смолы ЭД-20:

*a* — АНКУ 1; *б* — АНКУ 2; *в* — АНКУ 3; *г* — АНКУ 4; *д* — АНКУ 5; *е* — АНКУ 6

тов областей с более высокими прочностными характеристиками. При этом необходимо отметить, что эффективность от введения модификаторов во многом определяется набором «слабых» и «прочных» зон в структуре материала, их расположением в объеме и на поверхности.

В любом материале всегда имеется большое число различных дефектов, приводящих к высоким местным напряжениям. Дефектность и неоднородность структуры КСМ неизбежно возникает в процессе их создания, так как полимеры по своей природе гетерогенны, т.е. в одном и том же объеме при полимеризации одновременно формируются структуры многих типов. Границы раздела между такими структурными образованиями, как правило, являются дефектными зонами полимера.

Разрушение материала начинается с наиболее опасного дефекта, т.е. с зоны, обладающей наиболее низкими прочностными характеристиками. С увеличением напряжения число дефектных зон (очагов разрушения) возрастает и происходит процесс их слияния. Финальная стадия разрушения материала характеризуется достижением критического состояния в результате слияния большого числа дефектных зон.

Неоднородность распределения напряжений в сечении, являющаяся следствием структурной неоднородности, приводит к ступенчатому характеру разрушения материалов. Приложение внешней нагрузки, не превышающей критическую, вызывает разрушение части наиболее «слабых» и имеющих наибольший размер структурных элементов. Доля нагрузки, воспринимаемая разрушившейся частью, перераспределяется между оставшимися более «прочными» зонами.

Последующее возрастание внешней нагрузки, приводящее к локальным разрушениям с перераспределением нагрузки на сохранившиеся более «прочные» участки со стабилизацией состояния без разрушения образца, возможно лишь до определенной стадии нагружения. При некоторой нагрузке, являющейся критической, стабилизация состояния становится невозможной, и процесс перерастает в лавинообразное, с последовательным выходом из строя всех структурных элементов разрушения.

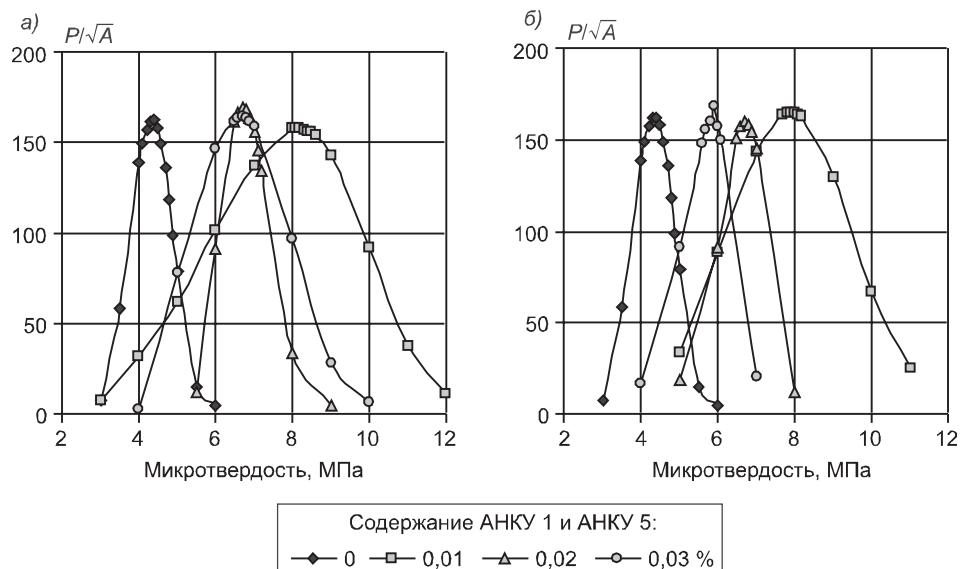


Рис. 3. Изменение отношения периметра к квадратному корню охватываемой площади ( $P/\sqrt{A}$ ) для эпоксидных композитов

### Значения «критической» микротвердости для 6 видов наночастиц АНКУ

Вид модификатора	Содержание наночастиц, % от массы связующего			
	0	0,01	0,02	0,03
АНКУ 1	4,4	8,2	6,7	6,7
АНКУ 2	4,4	7,2	7	7,7
АНКУ 3	4,4	8,9	8,3	8,2
АНКУ 4	4,4	7,8	7,2	7,5
АНКУ 5	4,4	7,9	6,7	5,9
АНКУ 6	4,4	5,9	5,4	5,5

тода «островов среза» основывается на изучении соотношения площади и периметра островов, образующихся при пересечении исследуемой поверхности горизонтальными плоскостями.

С помощью специально составленной программы определяли площадь и периметр островов среза (в пикселях), образующихся при различных уровнях микротвердости. Анализ полученных данных показал, что при «критической» величине микротвердости происходит резкое снижение периметра  $P$  при дальнейшем увеличении площади  $A$ . Перелом кривых (рис. 3), описывающих изменение параметра  $\rho = P/\sqrt{A}$  от величины микротвердости, свидетельствует о слиянии большого количества дефектных зон. Значения «критической» микротвердости для 6 исследуемых видов наномодификаторов приведены в таблице.

По результатам проведенных исследований можно предположить, что стадии разрушения композита соответствует «критическая» величина микротвердости (см. таблицу), полученная на основе метода «островов среза». На наш взгляд, именно значения «критической», а не средней арифметической микротвердости должны стать критерием при оценке эффективности вводимых модификаторов.

Результаты, представленные на рис. 4 в виде кривых изменения относительной «критической» микротвердости, показывают влияние наночастиц АНКУ на повышение данного параметра по сравнению с немодифицированным составом. Наибольшей эффективностью обладает модифика-

Этот критический уровень нагрузки и соответствует прочности композита, обладающего структурной неоднородностью.

Для определения критического уровня внешней нагрузки, задаваемого в данном случае величиной микротвердости, использовался подход, аналогичный методу «островов среза», используемого для описания фрактальных поверхностей разрушения [3, 4]. Общая идея ме-

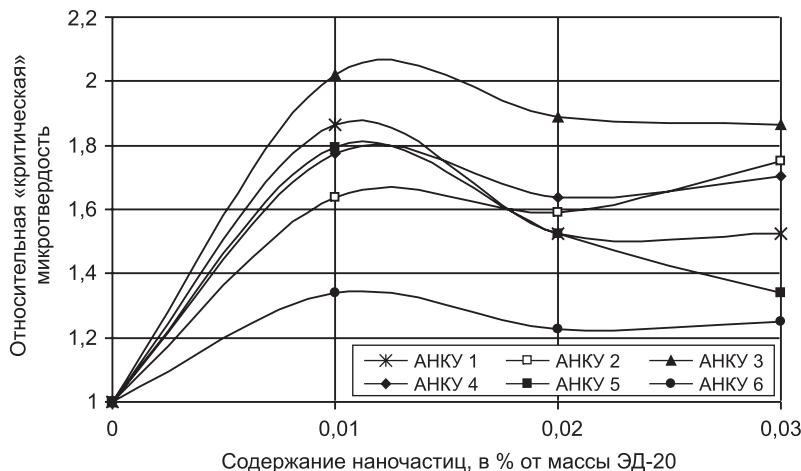


Рис. 4. Изменение значений относительной «критической» микротвердости эпоксидных композитов от вида и содержания наномодификаторов АНКУ

тор АНКУ 3, позволяющий повысить предельный уровень внешней нагрузки в 1,85–2 раза. Для наночастиц 1, 2, 4 и 5-го видов значения «критической» микротвердости превышают контрольный состав на 52 — 86 %. Наименьший эффект зафиксирован при введении АНКУ 6 и 0,03 % АНКУ 5.

Проведенное исследование позволило выявить дополнительный критерий для оценки предельного уровня нагрузки с учетом структурной неоднородности строительных материалов. Предлагаемый подход особенно эффективен при возможности получения обширных данных по распределению свойств по объему исследуемых композитов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селяев, В.П. Идентификация и анализ пористости строительных материалов [Текст] / В.П. Селяев, Т.А. Низина, О.А. Фролкин и др. // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2006610364 от 24.01.2006 г. в Роспатенте по заявке № 2005613072 от 24.11.2005 г.
2. Низина, Т.А. Применение программного комплекса «Идентификация и анализ пористости строительных материалов» для обработки результатов склерометрических испытаний [Текст] / Т.А. Низина, В.П. Селяев, С.Н. Кочетков, А.Н. Зимин // Вестн. Волж. региона. отд-ния РААСН ; вып. 13. — Н. Новгород : ННГАСУ, 2010. — С. 163–166.
3. Федер, Е. Фракталы [Текст] : пер. с англ. / Е. Федер. — М. : Мир, 1991. — 254 с.
4. Низина, Т.А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих [Текст] / Т.А. Низина. — Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2007. — 258 с.

НИЗИНА Т.А., д-р техн. наук, проф.; E-mail: nizinata@yandex.ru  
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск  
КИСЛЯКОВ П.А., асп.; E-mail: kisliy@yandex.ru  
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск  
ЗИМИН А.Н., асп.; E-mail: sasha-123\_85@mail.ru  
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск  
НИЗИН Д.Р., студ.; E-mail: nizindi@yandex.ru  
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Получено после доработки 16.02.11

**Nizina T.A.**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: nizinata@yandex.ru, Ogaryov Mordovian State University, Saransk, Russia

**Kislyakov P.A.**, post-graduate student; E-mail: kisliy@yandex.ru, Ogaryov Mordovian State University, Saransk, Russia

**Zimin A.N.**, post-graduate student; E-mail: sasha-123\_85@mail.ru, Ogaryov Mordovian State University, Saransk, Russia

**Nizin D.R.**, student; E-mail: nizindi@yandex.ru, Ogaryov Mordovian State University, Saransk, Russia

#### «CRITICAL» MICROHARDNESS AS CRITERION OF STRUCTURAL HETEROGENEITY OF BUILDING MATERIALS

The article investigated experimentally and analysis the distribution of microhardness of the epoxy composites inoculated by the water-soluble adducts nanoclusters of carbon. To study the distribution of properties of polymeric materials the authors used sclerometric method of research of microhardness applying a programm complex «Identification and the analysis of a porosity of building materials». The evaluation criterion of modicators

efficiency for structurally-non-uniform materials on the basis of «critical» microhardness modification defined on the basis of «section islands» method is proposed.

**Key words:** nanomodified epoxy aggregate, a sclerometric method of research, microhardness, structural heterogeneity, a defective working area.

#### REFERENCES

1. Selyaev, V.P. Identification and the analysis of a porosity of building materials [Text] / V.P. Selyaev, T.A. Nizina, O.A. Frolik etc. // Certificate on official registration of the computer program № 2006610364 from 24.01.2006 in Rospatent under the request № 2005613072 from 24.11.2005.
  2. Nizina, T.A. Application of a programm complex «Identification and the analysis of a porosity of building materials» for machining of results of sclerometric trials [Text] / T.A. Nizina, V.P. Selyaev, S.N. Kochetkov, A.N. Zimin // Bulletin of Volga regional partitioning off RAASN, exhaust 13. — Nizhni Novgorod : NNGASU, 2010. — P. 163–166.
  3. Feder, E. Fractals [Text] : the lane with English / E. Feder. — M. : Mir, 1991. — 254 p.
  4. Nizina, T.A. Protectively-decorative coatings on the basis of epoxy and the acrylic connecting [Text] / T.A. Nizina. — Saransk : Publishing house Mordov. univ., 2007. — 258 p.
-

## САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.92:728

А.Д. КРИВОШЕИН

### ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТЫ СИСТЕМ ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ С ОРГАНИЗОВАННЫМ ПРИТОКОМ ВОЗДУХА

Рассмотрены основные положения методики аэродинамического расчета систем естественной вентиляции жилых зданий на основе компьютерного моделирования. Приведены примеры расчетов, показано влияние на воздухообмен помещений характеристик приточных устройств, конструктивных особенностей систем вентиляции и др.

Ключевые слова: естественная вентиляция, приточные устройства, моделирование.

Повышение герметичности ограждающих конструкций современных зданий обусловило появление в последние годы ряда проблем, связанных с ухудшением или нарушением работы систем естественной вентиляции: уменьшение воздухообмена помещений, повышение относительной влажности воздуха, «опрокидывание» отдельных каналов с перетеканием грязного воздуха между квартирами, вплоть до поступления в помещения по вытяжным каналам наружного холодного воздуха.

В этой связи вопросы расчета и прогнозирования эксплуатационного состояния систем естественной вентиляции при различных сочетаниях внешних и внутренних воздействий приобретают особую актуальность.

Известен ряд фундаментальных работ [1–3], в которых сформулированы основные принципы расчета и проектирования систем естественной вентиляции, представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Известны работы по исследованию систем вентиляции современных зданий с учетом повышенной герметичности ограждающих конструкций [4].

Однако необходимость расчета и проектирования вентиляции жилых зданий различного конструктивного решения, в том числе с организованным притоком воздуха, необходимость анализа эффективности работы вентиляционных систем при различных режимах эксплуатации не позволяет ограничиться известными решениями и обуславливает актуальность дальнейших исследований в этой области. Под организованным притоком в данном случае понимается наличие в системах естественной вентиляции специальных устройств, обеспечивающих регулируемый приток воздуха в вентилируемые помещения.

При проведении подобных расчетов здание с его ограждающими конструкциями, вытяжными и приточными системами принято представлять в виде аэродинамической сети сложной геометрической формы, перемещение воздуха по отдельным участкам которой происходит в результате

температуры и ветровых перепадов давлений, дефлекторов, а также воздействия вытяжных или приточных вентиляторов.

Воздухообмен помещений осуществляется в результате притока воздуха через неплотности ограждающих конструкций, форточки, клапаны, а также в результате перетекания воздуха из соседних помещений или лестничной клетки, а удаление воздуха — через вытяжные вентиляционные каналы, ограждающие конструкции, перетекания в соседние помещения.

Цель прогнозирования эксплуатационного состояния систем вентиляции — определение расходов воздуха и распределения давлений по отдельным участкам аэродинамической сети.

Сложность задачи заключается в необходимости учета комплексного воздействия на здание ряда факторов — температуры, скорости ветра, различной воздухопроницаемости конструктивных элементов (входных дверей, окон, вытяжных каналов и приточных клапанов), их взаимного расположения и т.п. Более того, для прогнозирования эксплуатационного состояния здания необходим учет возможного изменения отдельных параметров в процессе эксплуатации, как внешних, например, скорости, направления ветра, температуры наружного воздуха и др., так и внутренних — открытие форточки, входной двери, изменяющих распределение перепадов давлений и воздушных потоков.

Решение задачи рассмотрено по аналогии с [1, 3] на основе представления отдельных помещений в виде самостоятельных узлов (блоков), соединенных между собой связями, характеризующими сопротивление определенных ограждающих конструкций (проемов) или вентиляционных каналов (рис. 1). К узлам под воздействием перепада давлений подходит и уходит определенное количество воздуха. При этом воздушный баланс каждого из узлов остается нулевым (количество поступившего воздуха равно ушедшему).

Узлами сети являются отдельные помещения, а также точки слияния и деления потоков воздушной среды.

Движение воздуха по рассматриваемой сети описано уравнениями вида [3]

$$P_k - P_m = S_i \times G_i^n, \quad (1)$$

где  $P_k$ ,  $P_m$  — давление в отдельных помещениях (узлах), Па;

$G_i$  — массовый расход воздуха по  $i$ -му участку сети между узлами  $k$  и  $m$ , кг/ч;

$S_i$  — характеристика сопротивления  $i$ -го участка сети,  $\text{ч}^2 \cdot \text{Па} / \text{кг}^2$ ;

$n$  — показатель фильтрации.

Если конструкция непосредственно граничит с наружным воздухом, то в уравнении (1) фигурирует давление наружного воздуха на уровне данной конструкции  $P_{\text{ext},i}$  и давление в рассчитываемом помещении  $P_{m,i}$

$$P_{\text{ext},i} - P_m = S_i \cdot G_i^n. \quad (2)$$

Число уравнений типа (1) и (2) определяется по расчетной схеме системы вентиляции здания и равно общему количеству связей, сходящихся в узлах.

Наружное давление  $P_{\text{ext},i}$  определяется гравитационной  $P_{g,i}$  и ветровой  $P_{v,i}$  составляющими

$$P_{\text{ext},i} = P_{g,i} + P_{v,i}; \quad (3)$$

$$P_{g,i} = h_i \cdot g \cdot (\rho_{\text{ext}} - \rho_{\text{int}}); \quad (4)$$

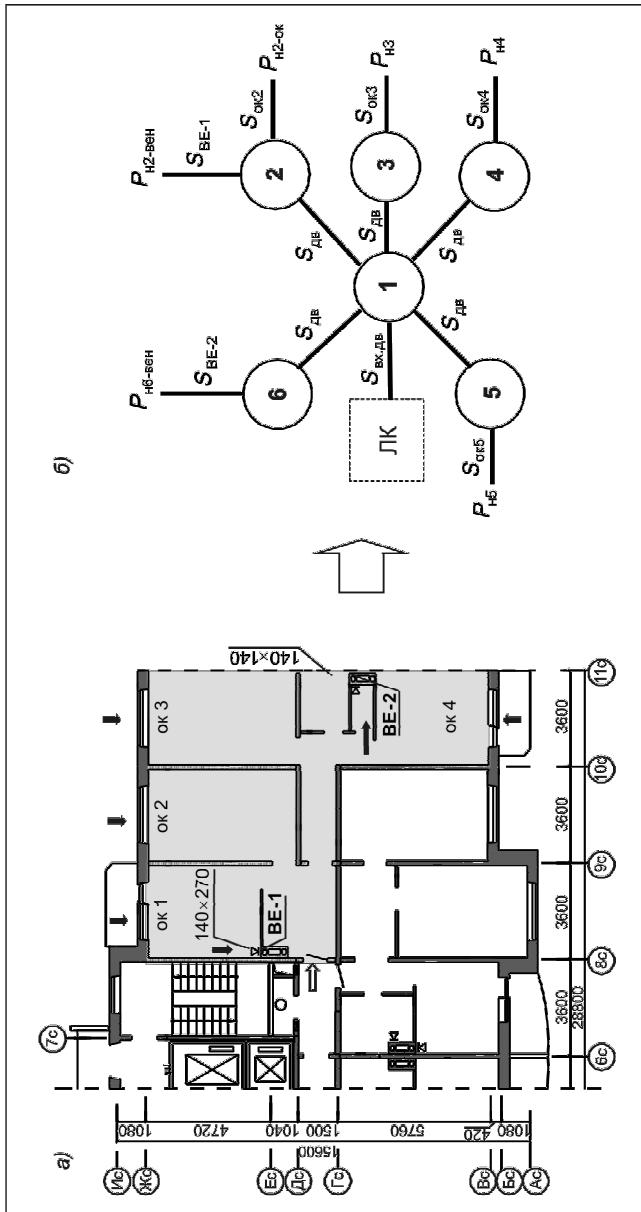


Рис. 1. Схематичный план (а) и расчетная схема (б) системы вентиляции трехкомнатной квартиры многоэтажного жилого дома с вертикальными сборными каналами (верхний этаж)

$$P_{v,i} = k_i \cdot \frac{v_{ext}^2}{2} \cdot \rho_{ext}, \quad (5)$$

где  $h_i$  — вертикальное расстояние от уровня условного нуля до центра рассматриваемой конструкции, м (для удобства расчетов за условный нуль принята отметка самой высокой вентиляционной шахты);

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

$\rho_{ext}$  и  $\rho_{int}$  — соответственно плотность наружного и внутреннего воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$k_i$  — аэродинамический коэффициент здания (для наветренной и заветренной сторон);

$v_{ext}$  — расчетная скорость ветра с учетом изменения по высоте,  $\text{м}/\text{с}$ .

Дополнительное разрежение, создаваемое дефлектором  $P_d$ , предложено рассчитывать по формуле (6) с учетом аэродинамического коэффициента дефлектора  $k_{def}$  и скорости ветра  $v_{ext}$

$$P_d = k \cdot (v_{ext}^2 / 2) \cdot \rho_{ext} - \xi_d \cdot (v_d^2 / 2) \cdot \rho_{int}, \quad (6)$$

где  $\xi_d$  — коэффициент местного сопротивления дефлектора (по результатам испытаний или справочным данным);  
 $v_d$  — скорость воздуха в дефлекторе, м/с.

При реализации данного подхода одной из задач является определение характеристик сопротивления отдельных участков сети  $S_i$ . Сложность заключается в необходимости увязки режимов течения воздуха в том или ином элементе с его геометрическими параметрами и перепадами давлений.

Характеристика сопротивления вентиляционных каналов может быть рассчитана по известной формуле [3]

$$S = \frac{\sum \xi + (\lambda_{tr} / d_{eq}) \cdot l}{2 \cdot \rho_{int} \cdot (f_k \cdot 3600)^2}, \quad (7)$$

где  $\sum \xi$  — сумма коэффициентов местных сопротивлений;

$\lambda_{tr}$  — коэффициент аэродинамического трения;

$d_{eq}$  — эквивалентный диаметр канала (воздуховода), м;

$f_k$  — площадь канала, м<sup>2</sup>;

$l$  — длина канала, м.

Для таких элементов, как окна, приточные клапаны, двери, стены и т.п., характеристику сопротивлений предложено принимать по результатам испытаний. В частности, расход воздуха через оконный блок может быть представлен уравнением вида

$$G = G_0 \cdot (\Delta P / \Delta P_{10})^n \cdot F, \quad (8)$$

где  $G_0$  — удельный расход воздуха через конструкцию при перепаде давлений 10 Па, кг/(м<sup>2</sup> · ч);

$\Delta P_{10}$  — перепад давлений 10 Па;

$n$  — показатель режима фильтрации;

$F$  — площадь оконного блока, м<sup>2</sup>.

Если привести данное выражение к виду (1), то несложно убедиться, что величина  $S_i$  может быть легко определена по формуле

$$S_i = \Delta P_{10} / (G_0 \cdot F_i)^{1/n}. \quad (9)$$

Аналогичный подход может быть применен и для входных дверей, отверстий, форточек, оконных фрамуг и т.п. при известных результатах испытаний и площади данных конструктивных элементов  $F_i$ .

Для приточных устройств выражение (9) приобретает вид

$$S_i = \Delta P_{10} / (G_0)^{1/n}. \quad (10)$$

Например, для оконных клапанов марки ЕММ фирмы «Аегесо» в полностью открытом состоянии  $S = 0,019$ , в закрытом —  $S = 0,223$ . Для стекловых вентиляционных клапанов «СВК В-75» с ветрозащитной планкой  $S = 0,021$  в диапазоне перепадов давлений от 0 до 12 Па,  $S = 3,1 \cdot 10^{-7}$  — при перепадах давлений более 12 Па (рис. 2).

В качестве примера в табл. 1 приведены значения характеристик сопротивления и показатели режима фильтрации некоторых ограждающих конструкций и элементов системы вентиляции.

В конечном счете, воздушный режим любого здания описывается системой нелинейных уравнений, составленных по пространственной расчетной схеме системы вентиляции. Критерий сходимости — равенство расходов воздуха по притоку и по вытяжке (сумма расходов воздуха по всем

участкам сети должна быть равна нулю; принятый при проведении расчетов допуск дебаланса расходов  $0,0001 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Для решения подобного рода задач разработана компьютерная программа «S-VENT V1.0».

В отличие от известных решений, разработанная программа позволяет учитывать изменение характеристик  $S$  при различных перепадах давлений на отдельных участках сети и рассматривать совместную работу приточных и вытяжных систем с большим количеством узлов и участков (ограничения практически отсутствуют и обусловлены лишь продолжительностью расчетов).

Рис. 2. Расход воздуха через некоторые типы приточных клапанов при различных перепадах давлений (по результатам испытаний)

практически отсутствуют и обусловлены лишь продолжительностью расчетов). В качестве примера на рис. 3 приведена расчетная схема одного из подъездов десятиэтажного жилого дома, учитывающая вытяжные вентиляционные каналы из квартир, входные двери, лестничную клетку, окна и приточные устройства, выходящие на разные фасады здания.

Тестовые расчеты, выполненные для ряда известных примеров [1,3], показали хорошую сходимость результатов расчетов по программе «S-VENT V1.0» с ранее опубликованными данными (в пределах 5–7 %).

Реализация изложенного подхода позволила провести анализ влияния на работу систем естественной вентиляции жилых многоэтажных зданий их конструктивного решения и ряда эксплуатационных факторов.

В качестве примера в табл. 2 приведены результаты расчетов вентиляции квартиры, представленной на рис. 1. При закрытых окнах вытяжные каналы даже такой простой системы не в состоянии обеспечить и 5 % от требуемого воздухообмена. Более того, вся система приходит в состояние неустойчивого равновесия. И достаточно небольшой разности в высотах оголовков каналов или разности температур удаляемого воздуха (см. табл. 2), чтобы система «опрокинулась» — один из каналов начал работать на приток, другой на вытяжку. Что и отмечается в реальных условиях эксплуатации. Система возвращается в проектный режим лишь при открытии створок оконных блоков или установке приточных вентиляционных устройств с заданными характеристиками сопротивления.

Анализ результатов расчетов, выполненных для зданий с различными системами вентиляции (рис. 4), позволил отметить некоторые закономерности и сделать ряд выводов.

1. Воздушный режим современных зданий вследствие герметичности ограждающих конструкций характеризуется большой неравномерностью; при открытии оконных створок или форточек воздухообмен в несколько раз превышает требуемые значения, при закрытии окон или приточных устройств — уменьшается на два и более порядка.

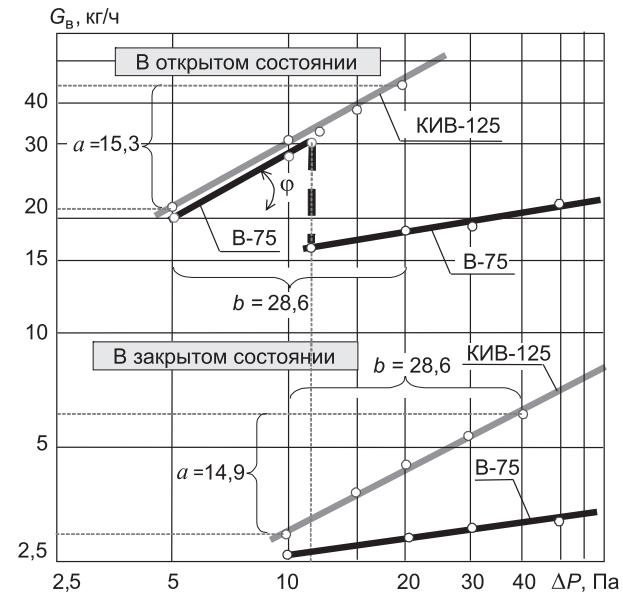


Рис. 2. Расход воздуха через некоторые типы приточных клапанов при различных перепадах давлений (по результатам испытаний)

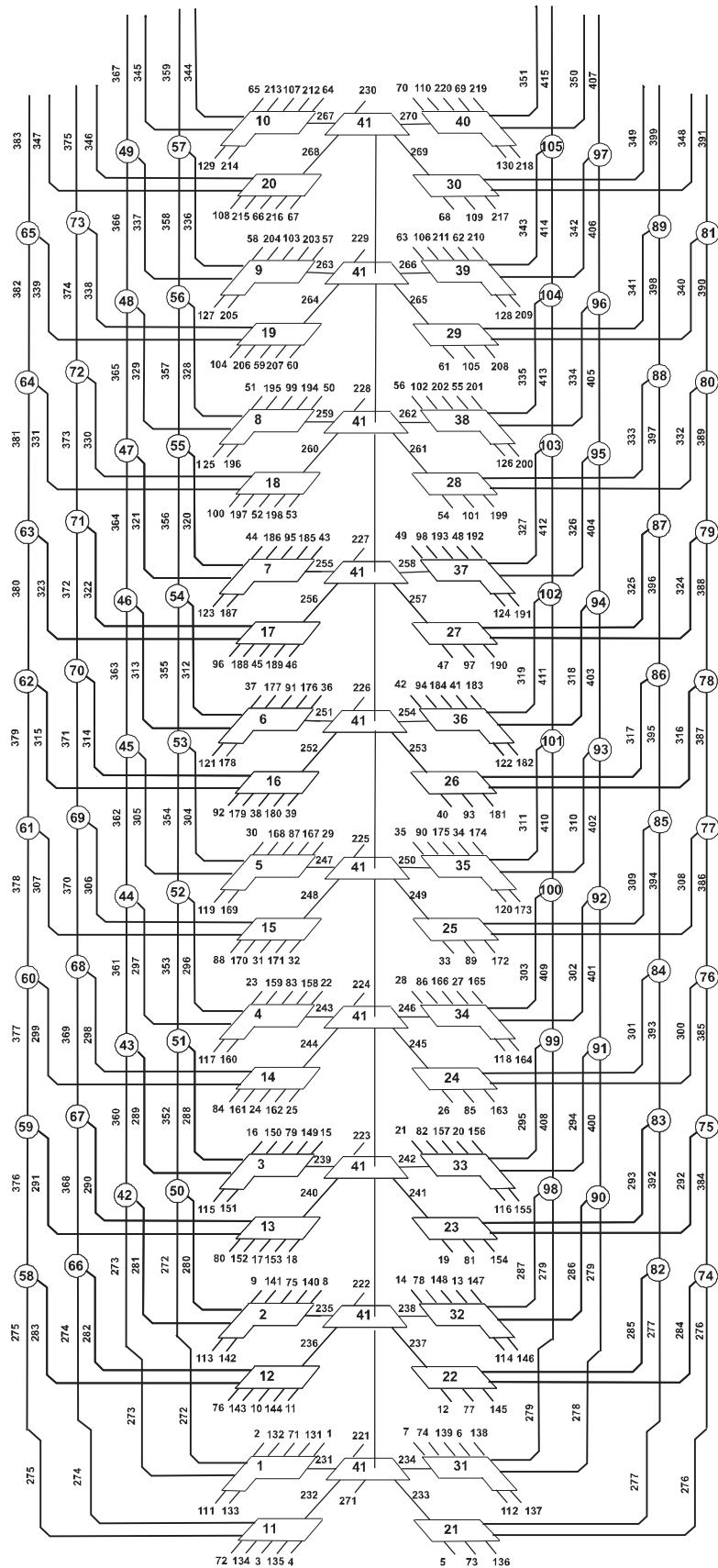


Таблица 1

**Характеристика сопротивления  $S$  и показателей режима фильтрации  $n$  некоторых элементов систем естественной вентиляции**

№ п.п	Описание элемента	$S$ , м <sup>2</sup> · Па / кг	$n$
1	Оконный блок в раздельных деревянных переплетах с уплотнением притворов шерстяным шнуром (размеры блока 1,5 × 1,5 м)	$2,1 \cdot 10^{-2}$	1,6
2	Оконный блок в переплетах из ПВХ-профилей по ГОСТ 30674-99	4,9	1,8
3	Открытая форточка размерами 0,2×0,2 м	$4,8 \cdot 10^{-5}$	2
4	Стеновой вентиляционный клапан СВК В-75 в открытом состоянии при $\Delta p \leq 12$ Па в открытом состоянии при $\Delta p > 12$ Па	$2,1 \cdot 10^{-2}$ $3,1 \cdot 10^{-7}$	1,9 6,0
5	Стеновой вентиляционный клапан КИВ-125 в открытом состоянии в закрытом состоянии	$1,9 \cdot 10^{-2}$ $126 \cdot 10^{-2}$	1,8 1,9
6	Оконный клапан ЕММ 3-30 «Аегесо» в открытом состоянии в закрытом состоянии	$1,9 \cdot 10^{-2}$ $22,3 \cdot 10^{-2}$	1,8 1,9
7	Вентиляционный канал сечением 140×140 мм, длиной 5 м при расходе воздуха 50 м <sup>3</sup> /ч при расходе воздуха 10 м <sup>3</sup> /ч	$2,9 \cdot 10^{-4}$ $6,1 \cdot 10^{-5}$	2 2

2. Определяющее влияние на распределение давлений и работу систем естественной вентиляции оказывает сопротивление элементов, работающих на приток (окна, входные двери, стенные или оконные клапаны). Сопоставление характеристик сопротивления отдельных элементов систем вентиляции и ограждающих конструкций (см. табл. 1), а также расходов воздуха и распределения перепадов давлений (см. рис. 4) показывает существенную зависимость воздухообмена прежде всего от потерь давления в приточных устройствах. В этой связи проектирование систем естественной вентиляции по традиционной методике без учета потерь давления на притоке (как это до сих пор практикуется во многих проектных организациях) не соответствует реальным условиям эксплуатации и неизбежно будет приводить к расхождению расчетных и фактических воздухообменов.

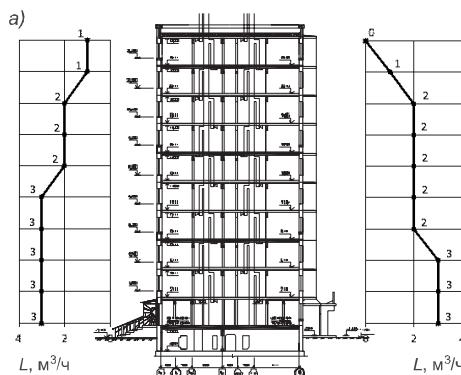
3. Системы вентиляции с вертикальными каналами требуют тщательной увязки как между собой, так и с приточными устройствами. При отсутствии организованного притока (или закрытии приточных устройств) подобные системы приходят в неустойчивое состояние и могут быть «опрокинуты». Увеличение высоты оголовков каналов, как это иногда пытаются применять в подобных ситуациях, не дает решения проблемы, поскольку основные потери располагаемого давления приходятся на приток.

4. Ветровые воздействия оказывают существенное влияние на работу систем вентиляции: на наветренной стороне здания создается избыточное давление, приводящее к увеличению расхода приточного воздуха (в том числе и через открытые приточные устройства), на заветренной

←  
Рис. 3. Расчетная схема системы вентиляции десятиэтажного жилого дома с вертикальными сборными каналами и приточными вентиляционными устройствами (типовая блок-секция с четырьмя квартирами на лестничной площадке)

Расход  
через окна,  
приточные  
клапаны

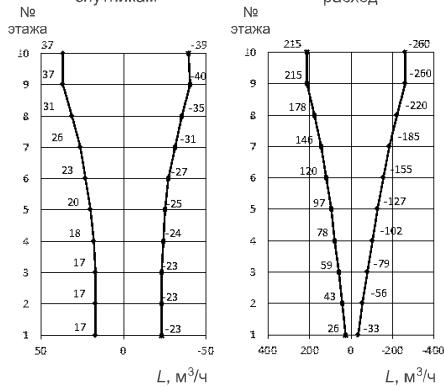
BE-1 BE-2



Расход  
через окна,  
приточные  
клапаны

Расход  
по каналам-  
спутникам

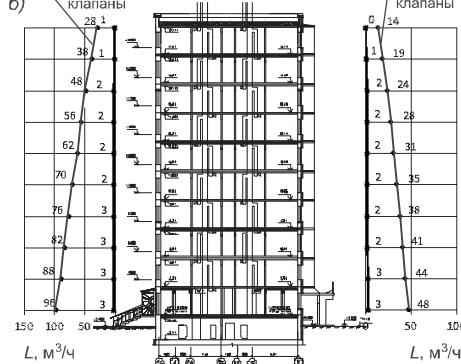
Суммарный  
расход



Приточные  
клапаны

Приточные  
клапаны

№ этажа



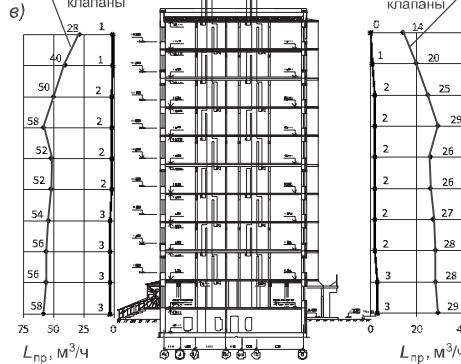
№ этажа

№ этажа

Приточные  
клапаны

Приточные  
клапаны

№ этажа



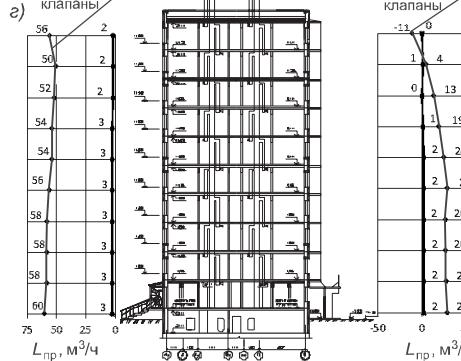
№ этажа

№ этажа

Приточные  
клапаны

Приточные  
клапаны

№ этажа



№ этажа

№ этажа

← Рис. 4. Результаты расчета распределения расхода воздуха по этажам здания без теплого чердака (трехкомнатные квартиры):

*a* — без приточных устройств при закрытых окнах (каналы BE-2 работают на приток); *b* — с приточными устройствами без авторегулирования; *v* — с авторегулированием приточных устройств по перепаду давлений; *z* — то же, при наличии ветра  $v = 5 \text{ м/с}$

стороне — разрежение (см. рис. 4, *z*). Для верхних этажей многоэтажных зданий величина ветровых перепадов на заветренной стороне может превышать тепловые перепады и соответственно приводить к перетеканию грязного воздуха из каналов в жилые помещения.

Отмеченные закономерности позволили сформулировать и ряд практических рекомендаций:

- обязательное применение приточных вентиляционных отверстий с регулируемым расходом воздуха;

- оснащение приточных отверстий ветрозащитными планками или другими механизмами регулирования расхода приточного воздуха, обеспечивающих постоянство расхода (авторегулирование) при изменении условий эксплуатации или внешних воздействий (данное решение обеспечивает еще и выравнивание воздухообменов квартир, расположенных на различных этажах по высоте здания, см. рис. 4, *v*);

- оснащение вытяжных вентиляционных каналов регулирующими клапанами, изменяющими сопротивление в зависимости от расхода воздуха (для исключения опрокидывания движения воздуха в вытяжных каналах);

- оснащение вытяжных шахт дефлекторами.

**Выводы.** Проектирование систем естественной вентиляции современных зданий с организованным притоком воздуха является достаточно сложной задачей, требующей учета совместной работы вытяжных каналов, их увязки с характеристиками приточных устройств, прогнозирования эксплуатационного состояния при различных сочетаниях внешних и внутренних воздействий.

От правильного решения этих вопросов в значительной мере зависит работоспособность и эксплуатационная надежность систем вентиляции в целом. Решение этой задачи в полном объеме возможно лишь с применением специальных компьютерных программ.

Таблица 2

**Результаты расчета системы вентиляции трехкомнатной квартиры верхнего этажа многоэтажного жилого дома\***

Расход воздуха через вытяжные каналы, м <sup>3</sup> /ч		Примечания
BE-1	BE-2	
Створки оконных блоков закрыты, приточные клапаны отсутствуют, устье каналов на одном уровне		
- 2,7	- 2,4	—
Створки оконных блоков закрыты, приточные клапаны отсутствуют, устье канала BE-1 выше канала BE-2 на 0,2 м		
- 20,9	+ 15,5	Канал BE-2 работает на приток
Створки оконных блоков закрыты, устье канала BE-1 выше канала BE-2 на 0,2 м, в жилых комнатах установлены стеновые клапаны		
- 38,4	- 8,4	Все каналы работают на вытяжку, клапаны — на приток

\* Расчеты выполнены при температуре наружного воздуха +5 °C.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ливчак, И.Ф. Вентиляция многоэтажных жилых домов [Текст] / И.Ф. Ливчак. — М. : Гос. изд-во архит. и градостроительства, 1951. — 174 с.
2. Константинова, В.Е. Расчет воздухообмена в жилых и общественных зданиях [Текст] / В.Е. Константинова. — М. : Стройиздат, 1964. — 156 с.
3. Гинзбург, Э.Я. Расчет отопительно-вентиляционных систем с помощью ЭВМ [Текст] / Э.Я. Гинзбург. — М. : Стройиздат, 1979. — 184 с.
4. Малевина, Е.Г. Воздушный режим высотного жилого здания в течение года [Текст] / Е.Г. Малевина, С.В. Бирюков, С.Н. Дианов. — Ч. 1 : Воздушный режим при естественной вытяжной вентиляции // АВОК. — 2004. — № 8. — С. 6–12.

*КРИВОШЕИН А.Д., канд. техн. наук, доц.; E-mail: gshomsk@mail.ru  
Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ),  
г. Омск*

Получено после доработки 19.01.11

**Krivoshein A.D.**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: gshomsk@mail.ru, Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI), Omsk, Russia

### BROADCASTING WORK OF NATURAL VENTILATION SYSTEM OF LIVING BUILDINGS WITH ORGANIZED AIR COMING

In this article considered the main propositions of estimated aerodynamic system of natural ventilation of domestic buildings methodolodgy with a glance of pressure loss in exhaust ducts and facilities of organized air intake on basis of computer simulation technique. Made an examples of calculating with a «SVENT — 1.0» program, revealed impact of input ventilation facilities features, constructive specifics of ventilation systems and etc. Adussed a number of practical recommendations.

**Key words:** natural ventilation, ventilating devices, modelling.

### REFERENCES

1. Livchak, I.F. Ventilation of multi-storey housing [Text] / I.F. Livchak. — M. : National publishing house of architecture and urban planning, 1951. — 174 p.
2. Konstantinova, V.E. Calculation of air exchange in the domestic and public buildings [Text] / V.E. Konstantinova. — M. : Stroyizdat, 1964. — 156 p.
3. Ginsburg, E.Ya. Calculating of heating and ventilation system with a computer [Text] / E.Ya. Ginsburg. — M. : Stroyizdat, 1979. — 184 p.
4. Malyavina, E.G. Air regime of high-rise apartment buildings during the year [Text] / E.G. Malyavina, S.V. Biryukov, S.N. Dianov. — P. 1 : Air regime with a natural drawing ventilation // Ventilation, firing, air conditioning, heating and building thermal physics (AVOK). — 2004. — N 8. — P. 6–12.

# СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ

УДК 625.72:528.486

Ю.В. СТОЛБОВ, Д.О. НАГАЕВ, С.Ю. СТОЛБОВА

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ВЫСОТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ПОКРЫТИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Выполнены исследования точности высотного положения (ровности) поверхности верхнего слоя покрытия автомобильной дороги, завершенной строительством. Рассчитаны статистические характеристики действительной точности высотного положения верхнего слоя покрытия автомобильной дороги. Осуществлена оценка сходимости эмпирического распределения отклонений фактических амплитуд (алгебраических разностей отметок) от нормируемых с теоретическим (по нормальному закону распределения).

Установлен коэффициент точности технологического процесса устройства верхнего слоя покрытия автомобильной дороги. Обоснованы допуски на геодезические измерения при контроле высотного положения (ровности) верхнего слоя покрытия автомобильных дорог.

**Ключевые слова:** точность, высотное положение, ровность, верхний слой покрытия, автомобильная дорога, допускаемые отклонения, амплитуды отметок точек, контрольные измерения.

Одним из основных показателей качества современного строительства является геометрическая точность возведения сооружений. Для автомобильных дорог одна из характеристик качества строительства — точность высотного положения (ровность) верхнего слоя покрытия. Несоблюдение нормативных требований высотного положения (ровности) верхнего слоя покрытия автомобильных дорог приводит к преждевременному выходу из строя транспортных средств и самого сооружения.

При строительстве автомобильных дорог показатели точности геометрических параметров изложены в СНиП 3.06.03–85 [1]. В этом нормативном документе приведены предельные отклонения (предельные погрешности) высотного положения (ровности) на завершенные строительством конструктивные слои оснований и покрытий автомобильных дорог. Там же, в разд. 14 «Приемка выполненных работ», даны предельные допускаемые отклонения (предельные погрешности) амплитуд вертикальных отметок (табл. 17) при использовании комплектов машин без автоматической и с автоматической системой задания вертикальных отметок, для различных категорий дорог, с шагом нивелирования 5, 10 и 20 м. При этом 90 % определений должны быть в пределах, указанных в этой таблице, а 10 % не должны превышать эти значения более чем в 1,5 раза. В обязательном же приложении № 2 [1] приведена таблица с параметрами, используемыми при оценке качества строительно-монтажных работ и

условиями их оценки. В этой таблице регламентируются нормы точности высотных отметок следующим образом: не более 10% (при оценке на «хорошо») и 5 % (при оценке на «отлично») результатов определений могут иметь отклонения от проектных значений до  $\pm 100(20)$  мм, остальные — до  $\pm 50(10)$  мм, где данные в скобках относятся к работам, выполненным с применением комплекта машин с автоматической системой задания вертикальных отметок. В СНиП 3.06.03–85 (п. 14.5) рекомендовано при приемке выполненных работ определение вертикальных отметок с шагом нивелирования 5, 10 и 20 м, но в каких случаях применяются шаги нивелирования 10 и 20 м не указывается.

При устройстве слоев оснований и покрытий автомобильных дорог возникают погрешности строительных, разбивочных работ и геодезических контрольных измерений. Нормы точности на выполнение разбивочных, строительных работ и контрольных измерений в СНиП 3.06.03–85 нет.

В настоящей статье рассматривается исследование точности высотного положения поверхности верхнего слоя покрытия завершенной строительством автомобильной дороги и обоснование допусков геодезического обеспечения ровности его устройства.

При исследовании точности высотного положения верхнего слоя дороги выполнялось техническое нивелирование с использованием нивелира Н-3 и трехметровой рейки с сантиметровыми делениями. Нивелирование поверхности верхнего слоя покрытия дороги (относительных отметок точек) осуществлялось на участках с равными уклонами, из середины между пикетами с шагом 5 м по левой, правой бровкам и центру полотна покрытия с максимальным удалением реек от нивелира порядка 50 м.

Путем нивелирования определены относительные высотные отметки и рассчитаны отклонения их от проектных. Нивелирование выполнялось из середины при установке инструмента на обочине в пределах смежных пикетов ( $S = 100$  м) с максимальным расстоянием порядка  $S_1 = 50$  м и минимальным —  $S_2 = 10$  м.

Среднеквадратическая погрешность взаимного высотного положения двух точек (разности их вертикальных отметок) с одной станции нивелирования определяется по формуле

$$m_r = \sqrt{m_{B_1}^2 + m_{B_2}^2 + m_o^2}, \quad (1)$$

где  $m_{B_1}$  и  $m_{B_2}$  — среднеквадратические погрешности взглядов на точки 1 и 2;

$m_o$  — среднеквадратическая погрешность несоблюдения главного условия нивелира из-за неравенства расстояний плеч  $S_1$  и  $S_2$ .

Тогда максимальная среднеквадратическая погрешность определения превышений, согласно [3], при  $m_{B_1} = 0,83$  мм,  $m_{B_2} = 0,62$  мм и  $m_o = 2,0$  мм составит  $m_r = 2,25$  мм.

По результатам отклонений относительных высотных отметок вычислим их алгебраические разности (амплитуды)

$$\delta h_i = \left| \frac{h_{i-1} + h_{i+1}}{2} - h_i \right|, \quad (2)$$

где  $h_{i-1}$  и  $h_{i+1}$  — относительные отметки предыдущей и последующей точек.

При нивелировании трех смежных точек (относительные отметки которых используются при вычислении амплитуд) поверхности верхнего слоя покрытия автомобильных дорог с шагом 5 м разница плеч между

крайними смежными точками равна 10 м, согласно (2) для определения амплитуд  $\delta h_i$ .

При нивелировании из середины трех смежных точек (необходимых для расчета амплитуд) с шагом через 5 м максимальные расстояния от нивелира до реек будут  $S_1 = 50$  м и  $S_2 = 40$  м. Тогда среднеквадратическая погрешность взаимного положения двух крайних точек при расчете амплитуд [3] при  $m_{B_1} = 0,83$  мм,  $m_{B_2} = 0,77$  мм и  $m_o = 0,5$  мм будет  $m_r = 1,24$  мм.

Полученные отклонения относительных высотных отметок от проектных и их статистическая обработка приведены в табл. 1.

Исследованию подвергались значения рассчитанных амплитуд (разности вертикальных отметок) по фактическим отклонениям вертикальных отметок от проектных при шаге нивелирования через 5 м по левой, правой бровкам и центру полотна. Результаты разбивались на интервалы шириной  $h$ , значение которой определялось по формуле Стэрджесса

$$h = R / (1 + 3,32 \cdot \lg N), \quad (3)$$

где  $R$  — размах варьирования;  $N$  — число измерений.

Статистическая обработка амплитуд вертикальных отметок верхнего слоя покрытия автомобильной дороги приведена в табл. 2.

Согласно СНиП 3.06.03-85 [1], предельные значения амплитуд при шаге через 5 м с использованием комплекта машин без автоматической системы задания вертикальных отметок равны 7 мм.

Оценки сходимости эмпирического распределения отклонений фактических амплитуд от нормируемых с теоретическим (по нормальному закону) с шагом через 5 м даны в табл. 3. Теоретическая и практическая кривые показаны на рисунке. Статистические характеристики ( $\bar{x}$  — среднеарифметическая взвешенная и  $m$  — среднеквадратическая погрешность) фактических амплитуд вертикальных отметок рассчитывали по известным формулам:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^K (n_i \cdot x_i) / N; \quad (4)$$

$$m = \sqrt{\sum_{i=1}^K (x_i - \bar{x})^2 / N - 1}, \quad (5)$$

где  $n$  — частота;  $N$  — объем выборки;  $K$  — число интервалов.

Определим значение доверительного интервала среднеквадратического отклонения фактических амплитуд вертикальных отметок  $\sigma_t$

$$m - t \cdot \frac{m}{\sqrt{2 \cdot (N - 1)}} < \sigma_t < m + t \cdot \frac{m}{\sqrt{2 \cdot (N - 1)}}, \quad (6)$$

где  $t$  — нормируемый множитель, зависящий от доверительной вероятности  $P$  и объема выборки  $N$ .

Исследования показали, что распределение погрешностей амплитуд вертикальных отметок верхнего слоя покрытия автомобильной дороги соответствует закону нормального распределения, хотя число значений отклонений, превышающих нормативные, составляет 9 % ( $\delta_h = 7$  мм — 81 %,  $\delta_n = 7$  мм · 1,5 — 10 %).

Значение амплитуд отметок точек поверхностей слоев оснований и покрытий будет зависеть от точности технологического процесса их устройства, которая находится, согласно [2]:

Таблица 1  
Статистическая обработка отклонений вертикальных отметок поверхности верхнего слоя покрытия

Интервалы		Частота $n_i$	Частотность $W_i$	Середина интервала $x_i$	$n_i \cdot x_i$	$x_i - \bar{x}$	$n_i \cdot (x_i - \bar{x})$	$n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2$	$t_1$	$t_2$	$\Phi(t_1)$	$\Phi(t_2)$	Вероятность $P(x_i)$
$a$	$b$												
-36	-27	8	0,033	-31,5	-252	-32,96	-263,70	8692,46	-2,54	-1,93	-0,4945	-0,4732	0,0213
-27	-18	23	0,095	-22,5	-517,5	-23,96	-551,15	13207,14	-1,93	-1,32	-0,4732	-0,4066	0,0666
-18	-9	20	0,082	-13,5	-270	-14,96	-299,26	4477,81	-1,32	-0,71	-0,4066	-0,2611	0,1455
-9	0	54	0,222	-4,5	-243	-5,96	-322,00	1920,07	-0,71	-0,10	-0,2611	-0,0398	0,2213
0	9	64	0,263	4,5	288	3,04	194,37	590,31	-0,10	0,51	-0,0398	0,1950	0,2348
9	18	44	0,181	13,5	594	12,04	529,63	6375,17	0,51	1,12	0,1950	0,3686	0,1736
18	27	21	0,086	22,5	472,5	21,04	441,78	9293,70	1,12	1,73	0,3686	0,4582	0,0896
27	36	9	0,037	31,5	283,5	30,04	270,33	8120,01	1,73	2,34	0,4582	0,4904	0,0322
		243	1,0		355,5			52676,67					0,9849

$$\bar{x} = 355,5 / 243 = 1,46 \text{ мм}; \quad m = \sqrt{\frac{52676,67}{242}} = 14,75 \text{ мм}; \quad m_{\tau} = 14,75 / \sqrt{2 \cdot (243 - 1)} = 0,67 \text{ мм.} \quad \text{Доверительный интервал для } \langle \sigma \rangle :$$

$$m - t \cdot \frac{m}{\sqrt{2 \cdot (N - 1)}} < \sigma < m + t \cdot \frac{m}{\sqrt{2 \cdot (N - 1)}} \quad 14,75 - 2 \cdot 0,67 < \sigma < 14,75 + 2 \cdot 0,67; \quad 13,41 \text{ мм} < \sigma < 16,19 \text{ мм.}$$

Таблица 2

## Статистическая обработка амплитуд вертикальных отмечей поверхности верхнего слоя покрытия

Интервал		$n_i$	Частота $W_i$	Частота $n_i$	Середина интервала $x_i$	$n_i \cdot x_i$	$x_i - \bar{x}$	$n_i \cdot (x_i - \bar{x})^2$	$t_1$	$t_2$	$\Phi(t_1)$	$\Phi(t_2)$	Вероятность $P(x_i)$
$a$	$b$												
-16	-12	5	0,021		-14	-70	-13,81	-69,03	953,02	-2,66	-1,98	-0,4961	-0,4761
-12	-8	17	0,072		-10	-170	-9,81	-166,70	1634,65	-1,98	-1,31	-0,4761	-0,4049
-8	-4	37	0,156		-6	-222	-5,81	-214,82	1247,22	-1,31	-0,64	-0,4049	0,0712
-4	0	67	0,283		-2	-134	-1,81	-121,00	218,51	-0,64	0,03	-0,2389	0,1660
0	4	56	0,236		2	112	2,19	122,87	269,59	0,03	0,70	0,0120	0,2509
4	8	33	0,139		6	198	6,19	204,41	1266,10	0,70	1,38	0,2580	0,2460
8	12	17	0,072		10	170	10,19	173,30	1766,63	1,38	2,05	0,4162	0,1582
12	16	5	0,021		14	70	14,19	70,97	1007,36	2,05	2,72	0,4798	0,0636
		237	1,0			-46			8363,07				0,9928

$\bar{x} = -46 / 237 = -0,19$  ММ;  $m = \sqrt{\frac{8363,07}{236}} = 5,95$  ММ;  $m_{\tau} = 5,95 / \sqrt{2 \cdot (237 - 1)} = 0,27$  ММ. Доверительный интервал для « $\sigma$ »:  
 $m - t \cdot \frac{m}{\sqrt{2 \cdot (N - 1)}} < \sigma < m + t \cdot \frac{m}{\sqrt{2 \cdot (N - 1)}}$   $5,95 - 2 \cdot 0,27 < \sigma < 5,95 + 2 \cdot 0,27$ ;  $5,41$  ММ  $< \sigma < 6,49$  ММ.

$$T_{\pi} = \frac{\delta_{\pi}}{\sigma_{\pi}}, \quad (7)$$

где  $\delta_{\pi}$  — допускаемое значение амплитуд вертикальных отметок, нормируемых СНиП 3.06.03–85, мм;

$\sigma_{\pi}$  — среднеквадратическое отклонение амплитуд вертикальных отметок слоев оснований и покрытий, мм.

В ходе исследований установлено, что при шаге через 5 м  $\bar{x} = -0,19$  мм и  $m_{\pi} = 5,95$  мм,  $5,41 \text{ мм} < \sigma_{\pi} < 6,49$  мм. Коэффициент точности технологического процесса устройства верхнего слоя покрытия будет при шаге через 5 м  $T_{\pi_1} = 7 / 6,49 \approx 1,1$ .

Учитывая, что по СНиП 3.06.03–85 90 % определений результатов должны быть в пределах, указанных в табл. 17, предельная погрешность при доверительной вероятности  $P = 0,9$  будет равна при шаге через 5 м  $\delta_{\pi} = 1,645 \cdot m_{\pi} = 1,645 \cdot 5,95 = 9,79$  мм.

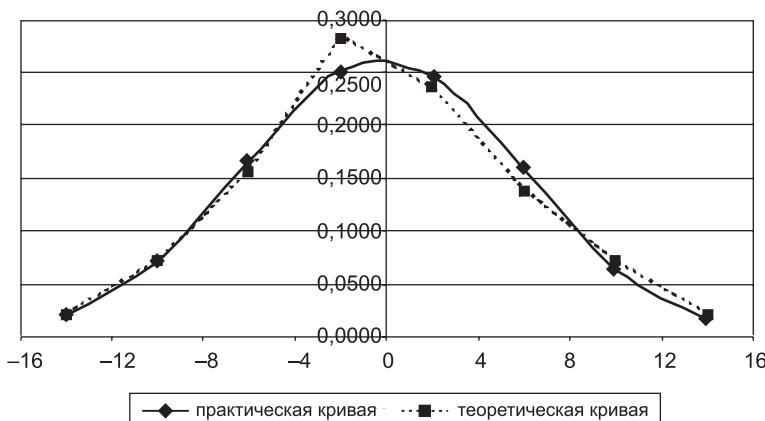
Таблица 3

**Оценка сходимости эмпирического распределения амплитуд вертикальных отметок поверхности верхнего слоя покрытия с нормальным.**

**Критерий  $\chi^2$  Пирсона**

Интервалы		Частота $n_i$	$P(x_i)$	$NP(x_i)$	$[n_i - NP(x_i)]$	$[n_i - NP(x_i)]^2$	$\frac{[n_i - NP(x_i)]^2}{NP(x_i)}$
$a$	$b$						
-16	-12	5	0,0200	4,740	0,260	0,068	0,01
-12	-8	17	0,0712	16,874	0,126	0,016	0,00
-8	-4	37	0,1660	39,342	-2,342	5,485	0,14
-4	0	67	0,2509	59,463	7,537	56,802	0,96
0	4	56	0,2460	58,302	-2,302	5,299	0,09
4	8	33	0,1582	37,493	-4,493	20,191	0,54
8	12	17	0,0636	15,073	1,927	3,713	0,25
12	16	5	0,0169	4,005	0,995	0,989	0,25
		237					2,23

При  $K = 8$  число степеней свободы равно 5.  $\chi^2(0,05; 5) = 11,1$ . Таким образом,  $2,23 < 11,1$ . Нулевая гипотеза не отвергается.



Гистограмма отклонения амплитуд вертикальных отметок поверхности верхнего слоя покрытия

Следовательно, точность высотного положения верхнего слоя покрытия при шаге через 5 м ниже нормативного, так как  $\delta_c = 9,79$  мм  $> \delta_n = 7$  мм.

При коэффициенте точности технологического процесса устройства верхнего слоя покрытия  $T_n = 1,0$  предельная погрешность (допускаемое отклонение) контрольных геодезических измерений [2] должна быть не более  $\delta_r = 0,45 \cdot \delta_n = 0,45 \cdot 7 = 3,15$  мм, а среднеквадратическая погрешность при доверительной вероятности  $P = 0,9$  — не более  $m_r = \delta_r / 1,645 = 3,15 / 1,645 = 1,91$  мм.

При нивелировании с шагом через 5 м, максимальном расстоянии от нивелира до реек  $S_1 = 100$  м и  $S_2 = 90$  м [3] значение  $m_{b_1} = 1,17$  мм,  $m_{b_2} = 1,09$  мм и  $m_o = 0,5$  мм, тогда  $m_r = 1,68$  мм.

Следовательно, при геодезическом контроле ровности устройства верхнего слоя покрытия автомобильных дорог максимальное расстояние от нивелира до рейки может быть порядка 100 м.

Выполненные исследования показывают, что нормы, регламентируемые в СНиП 3.06.03–85, не всегда обеспечиваются на практике. Для обеспечения заданного высотного положения (ровности) верхних слоев покрытия автомобильных дорог необходимы обоснованные нормы точности не только по завершению их строительства, но и на разбивочные и строительные работы в процессе их устройства. При этом необходимо наложить технологический процесс по их устройству не по предельным нормируемым допускаемым отклонениям, а по среднеквадратическим погрешностям разбивочных и строительных работ с доверительной вероятностью ( $P = 0,9$  или  $P = 0,95$ ).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 3.06.03–85. Автомобильные дороги. Госстрой СССР [Текст]. — М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1985. — С. 106.
2. Столбов, Ю.В. О нормировании точности контрольных измерений при монтаже строительных конструкций [Текст] / Ю.В. Столбов, В.В. Столбов // Промышленное строительство. — 1978. — № 4. — С. 29–31.
3. Практическое пособие по метрологическому обеспечению строительного производства [Текст]. — М. : Стройиздат, 1975. — 64 с.

СТОЛБОВ Ю.В., д-р техн. наук, проф.

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ),  
г. Омск

НАГАЕВ Д.О., асп.

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ),  
г. Омск

СТОЛБОВА С.Ю., канд. техн. наук, доц.

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ),  
г. Омск

Получено после доработки 07.02.11

**Stolbov Yu.V.**, doctor of technical sciences, professor, Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI), Omsk, Russia

**Nagaev D.O.**, post-graduate student, Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI), Omsk, Russia

**Stolbova S.Yu.**, candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI), Omsk, Russia

## **RESEARCH OF ACCURACY OF HIGH-ALTITUDE POSITION OF THE SURFACE OF THE TOP LAYER OF THE COVERING OF THE HIGHWAYS**

Researches of accuracy of high-rise position (flatness) of a surface of the top coat layer of the highway finished by building are executed. Statistical characteristics of the valid accuracy of high-rise position of the top coat layer of a highway are calculated. The estimation of convergence of empirical distribution of deviations of actual amplitudes (algebraic differences of marks) from normalized with theoretical (under the normal law of distribution) is carried out.

The factor of accuracy of technological process of the device of the top coat layer of a highway is established. Admissions on geodetic measurements at control of high-rise position (flatness) of the top coat layer of highways.

**K e y w o r d s:** accuracy, high-rise position, flatness, the top coat layer, highway, permissible deviations, amplitudes of marks of points, control measurements.

### REFERENCES

1. SNiP 3.06.03-85. Highways. Gosstroy of the USSR [Text]. — M. : CITP of Gosstroy of the USSR, 1985. — P. 106.
  2. Stolbov, Yu.V. Columns About rationing of accuracy of control measurements at installation of building designs [Text] / Yu.V. Stolbov, V.V. Stolbov // Industrial building. — 1978. — N 4. — P. 29-31.
  3. Practical grant on metrological maintenance of building manufacture [Text]. — M. : Stroyizdat, 1975. — 64 p.
-

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.878.6:625.76.08

В.Б. ПЕРМЯКОВ, А.С. СЕМЕНОВ

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ФОРМЫ ВЫРЕЗАЕМОЙ СТРУЖКИ ГРУНТА САМОХОДНЫМИ СКРЕПЕРАМИ

Кратко описывается методика обоснования выбора формы вырезаемой стружки грунта и технологических параметров работы скрепера (рабочая скорость машины, форма и толщина вырезаемой стружки), базирующаяся на теоретических исследованияхкопания. Показана практическая реализация методики на примере трех скреперов различных размерных групп. Произведено сравнение двух геометрических форм стружек для работы на грунтах I и II категорий.

**Ключевые слова:** дорожное строительство, скрепер, прямая стружка, клиновая стружка, рабочая скорость, толщина стружки, производительность.

Скреперы относятся к высокопроизводительным землеройно-транспортным машинам циклического действия и предназначены для разработки и транспортирования грунта с его укладкой в насыпь или отвал слоями заданной толщины. Важной технологической операцией в рабочем цикле скрепера, оказывающей значительное влияние на производительность, является наполнение ковша скрепера. Оптимизация технологических параметров этой операции позволяет добиться максимальной производительности.

В зависимости от категории грунта скреперы производят его копание различными формами стружек: прямой, клиновой и гребенчатой (рис. 1, а–в соответственно). Прямую стружку используют для копания грунта I, II категорий с постоянной величиной заглубления ковша скрепера. Клиновая стружка также применяется на грунтах I, II категорий, но траектория движения ножа по мере заполнения ковша образует не прямую форму стружки, а клиновую. Гребенчатая форма стружки используется при разработке твердых и пересохших грунтов (III, IV категория).

Одним из основных технико-экономических критериев, определяющих эффективность использования скреперов, является их производительность.

Аналитически сменную эксплуатационную производительность скрепера ( $\text{м}^3/\text{см}$ ) [1] определяют по формуле

$$\Pi_{\text{см}} = (T_{\text{см}} q k_h k_v) / (T_{\text{ц}} k_p), \quad (1)$$

где  $T_{\text{см}}$  — продолжительность рабочей смены, ч;

$q$  — геометрическая вместимость ковша,  $\text{м}^3$ ;

$k_v$  — коэффициент использования сменного времени;

$k_h$  — коэффициент наполнения ковша грунтом;

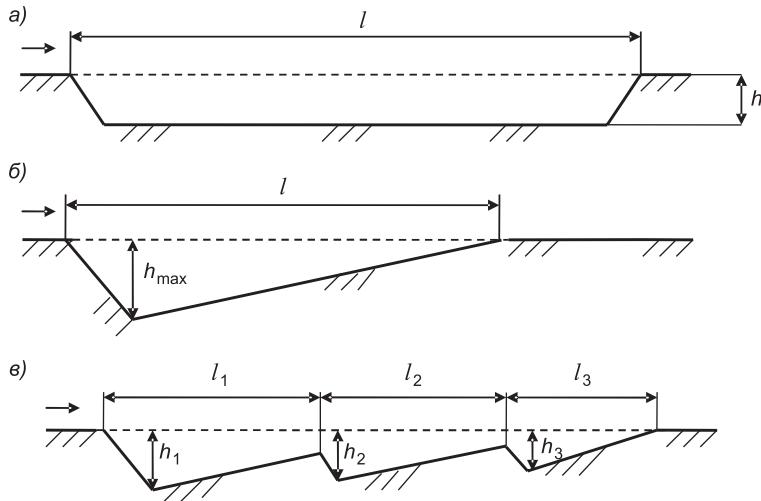


Рис. 1. Формы вырезаемых грунтовых стружек

*a* — прямая, *б* — клиновая, *в* — гребенчатая. Стрелкой указано направление движения скрепера

$k_p$  — коэффициент разрыхления грунта;

$T_{\text{ц}}$  — продолжительность рабочего цикла скрепера (с), равная

$$T_{\text{ц}} = t_{\text{н}} + t_{\text{px}} + t_{\text{p}} + t_{\text{xx}} + \Sigma t, \quad (2)$$

где  $t_{\text{н}}$  — время наполнения ковша грунтом;

$t_{\text{px}}$  — продолжительность транспортирования от забоя до места отсыпки грунта;

$t_{\text{p}}$  — время разгрузки ковша;

$t_{\text{xx}}$  — продолжительность возвращения порожнего скрепера в забой;

$\Sigma t$  — время, затрачиваемое на маневры скрепера.

При работе тонкой стружкой копание производится на более высокой скорости в начальном этапе, но при этом увеличивается путь набора грунта. Производя разработку грунта более толстой стружкой, копание происходит на меньших скоростях, однако путь набора грунта сокращается за счет более интенсивного наполнения ковша скрепера. Для определения коэффициента наполнения ковша грунтом  $k_{\text{н}}$  и продолжительности рабочего цикла скрепера  $T_{\text{ц}}$  необходимо определить момент, в котором поступление грунта в ковш прекратится. Для осуществления наполнения ковша скрепера необходимо, чтобы окружная сила  $P_k$  на шинах ведущих колес была равна или несколько превышала суммарное сопротивление.

Расчет сил сопротивления производится по методу Е.Р. Петерса. Общее сопротивление, возникающее в конце наполнения  $W_{\text{общ}}$ , складывается из следующих составляющих [2]:

$$W_t = W_t + W_p + W_h + W_n, \quad (3)$$

где  $W_t$  — сопротивление перемещению, кН;

$W_p$  — сопротивление резанию, кН;

$W_h$  — сопротивление наполнению, кН;

$W_n$  — сопротивление перемещению призмы волочения, кН.

Чтобы уменьшить величину сопротивлений наполнению скрепера на заключительной стадии, обычно наполнение производят на минимально возможной толщине стружки, при условии полного использования силы

тяги скрепера. Процесс наполнения ковша скрепера происходит на грани образования призмы волочения за счет скола стружки [3].

Найдем сопротивление перемещению груженого скрепера

$$W_t = (G_c + V_{rp} \cdot \gamma_r / k_p)(f + i), \quad (4)$$

где  $G_c$  — вес скрепера, кН;

$V_{rp}$  — объем грунта в ковше, м<sup>3</sup>;

$\gamma_r$  — объемный вес грунта в естественном залегании, т/м<sup>3</sup>;

$k_p$  — коэффициент разрыхления грунта в ковше скрепера;

$f$  — коэффициент сопротивления передвижению;

$i$  — уклон поверхности движения.

Для продолжения наполнения ковша на определенной передаче необходимо, чтобы сумма сопротивлений не превышала максимальное окружное усилие, развиваемое тягачом на этой передаче.

Сопротивление грунта резанию определяется как

$$W_p = kbh, \quad (5)$$

где  $k$  — удельное сопротивление резанию, кН/м<sup>2</sup>;

$b$  — ширина резания, м;

$h$  — толщина стружки, м.

Полное сопротивление наполнению  $W_h$  складывается из сопротивления силы тяжести грунта  $W_h$ , кГ, поступающего в ковш, и сопротивления трению грунта в ковше  $W_h$ , кГ.

Вычислим сопротивление силы тяжести поднимаемого столба грунта

$$W_h = bhH\gamma_r, \text{ кГ}, \quad (6)$$

где  $H$  — высота грунта в ковше.

Сопротивление трению грунта по грунту в ковше возникает в результате давления боковых призм, располагающихся по обе стороны столба грунта, при его перемещении в вертикальном направлении внутри ковша

$$W_h = xbH^2\gamma_r, \text{ кГ}, \quad (7)$$

где  $x$  — коэффициент, учитывающий угол внутреннего трения.

Высота грунта в ковше определяется из зависимостей, найденных экспериментальным путем К.А. Артемьевым (К.А. Артемьев «Скреперы»). Для супесей и суглинков данная зависимость выражается формулой

$$V_{rp} = m(0,54H + 0,48H^2 + H^3), \quad (8)$$

где  $m$  — соотношение между длиной и шириной ковша для ковша скрепера.

Сопротивление перемещению призмы волочения равно

$$W_n = ybH_{rp}^2\gamma_r\mu_2, \quad (9)$$

где  $y$  — коэффициент объема призмы волочения перед заслонкой и ножами ковша;

$\mu_2$  — коэффициент трения грунта по грунту.

На рис. 2 представлен график роста сопротивлений, возникающих в процессе увеличения объема грунта в ковше скрепера,  $V_{rp}$ . Копание производилось скрепером МоАЗ-6007 с геометрической вместимостью ковша 11 м<sup>3</sup>, разрабатываемый грунт представлен средним суглинком II категории. Копание осуществлялось прямой и клиновой стружками, толщина прямой стружки составляла  $h = 0,2$  м. Анализ этих результатов показывает, что все виды сопротивлений возрастают с увеличением объема грунта в ковше. Наиболее интенсивно изменяется сопротивление напол-

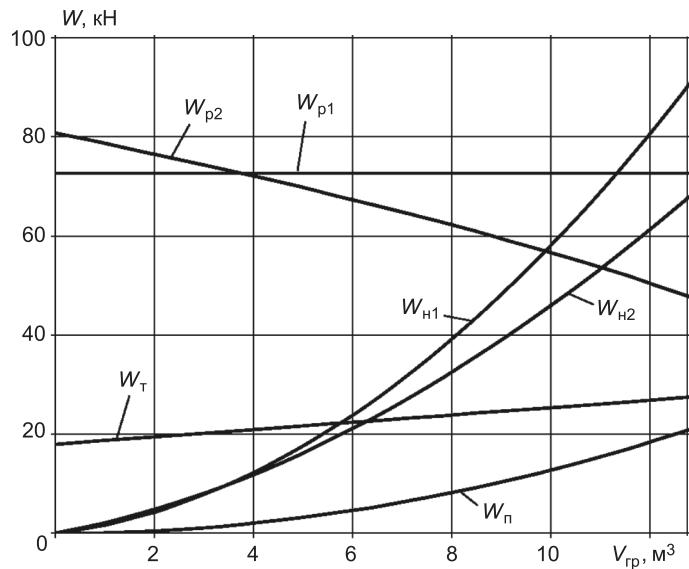


Рис. 2. Зависимость между сопротивлениями и объемом грунта в ковше при копании прямой и клиновой формами стружек скрепером МоАЗ-6007:

$W_t$  — сопротивление перемещению скрепера;  $W_p$  — сопротивление перемещению призмы волочения;  $W_{p1}$ ,  $W_{p2}$  — соответственно сопротивление резанию для прямой и клиновой стружки;  $W_{h1}$ ,  $W_{h2}$  — сопротивление наполнению для прямой и клиновой стружки соответственно

нению  $W_{h1}$ . Сопротивление резанию  $W_{p1}$  практически остается постоянным в процессе наполнения ковша. Несколько другая картина наблюдается при работе клиновой стружкой, которая в начале копания составляет до  $h_{\max} = 0,3$  м и в конце выглубления снижается до 0,16 м. При копании клиновой стружкой в процессе наполнения ковша грунтом сопротивление резанию в завершающей стадии снижается, так как его значение находится в прямой зависимости от толщины вырезаемой стружки грунта, которая в процессе копания постепенно уменьшается. Помимо этого наблюдается снижение сопротивления наполнению  $W_{h2}$ , в связи с тем, что уменьшается сопротивление силы тяжести поднимаемого столба грунта.

В совокупности за счет снижения сопротивлений резанию грунта и наполнению ковша по сравнению с прямой стружкой мы добиваемся уменьшения суммарного сопротивления в конце процесса наполнения. При наполнении ковша на 50 % общее сопротивление при копании клиновой стружкой меньше на 4,8 % по сравнению с общим сопротивлением при использовании прямой стружки. И при наполнении ковша на 100 % общее сопротивление при копании клиновой стружкой меньше на 16,7 % по сравнению с общим сопротивлением при использовании прямой стружки.

Однако при копании клиновой формой стружки повышается сопротивление перемещению призмы волочения, так как уменьшение толщины вырезаемой стружки приводит к тому, что сопротивление стружки сколу уменьшается.

Определение оптимальной толщины стружки прямой формы также требует аналитического подхода. При ее определении обычно используются рекомендации, которые содержатся в нормативной (СНиП), ЕНиР № 2 и научно-исследовательской литературе. В существующих рекомендациях толщина стружки определяется исходя из геометрической вместимости ковша и грунтовых условий. Однако тяговая мощность базовой машины, а также конструктивные особенности ковша скрепера в этом

случае учитываются лишь косвенно через геометрическую вместимость ковша.

На графике (рис. 3) представлены величины сопротивлений для трех значений толщины стружек. Копание грунта II категории производилось скрепером МоАЗ-6014 с геометрической вместимостью ковша  $8,2 \text{ м}^3$ . В начале копания грунта стружкой толщиной  $h = 0,15 \text{ м}$  на II передаче достигается значительный коэффициент наполнения ковша ( $k_h = 1,06$ ) благодаря значительному запасу тяговой мощности. Затем перейдя на I передачу, коэффициент наполнения увеличивается до  $k_h = 1,36$ . Однако следует отметить, что при копании грунта тонкой стружкой ( $h = 0,15 \text{ м}$ ) значительная часть грунта уходит в призму, а не в ковш, поскольку она имеет меньшее сопротивление сколу. В конечном результате получаем коэффициент наполнения  $k_h = 1,36$  при самом длительном рабочем цикле ( $T_u$ ).

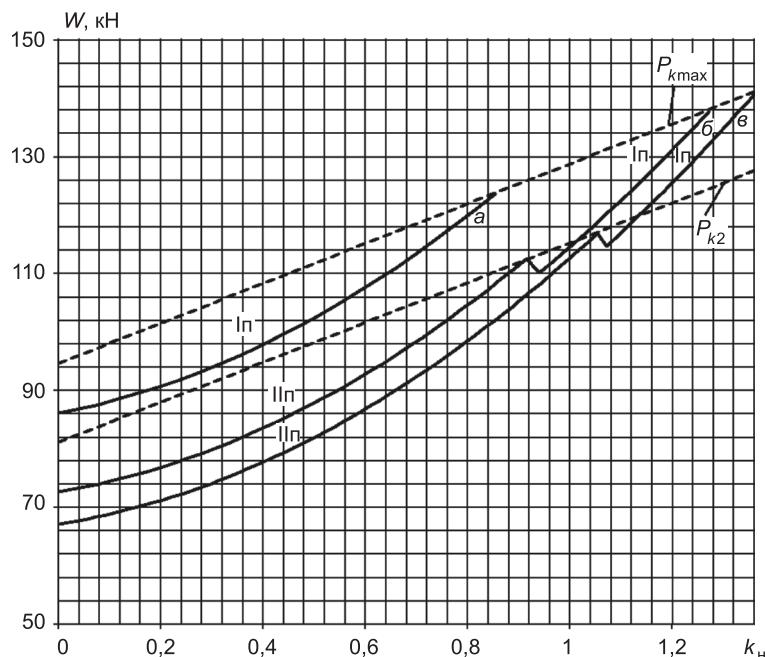


Рис. 3. Зависимость между суммарным сопротивлением и коэффициентом наполнения ковша скрепера МоАЗ-6014  $k_h$  при различной толщине стружки  $h$

$a — h = 0,21 \text{ м}; b — h = 0,18 \text{ м}; v — h = 0,15 \text{ м}.$   $I_{\Pi}, II_{\Pi}$  — соответственно 1-я и 2-я передача;  $P_{k\max}$  — максимальное окружное усилие на ведущих колесах (1-я передача);  $P_{k2}$  — максимальное окружное усилие на ведущих колесах (2-я передача)

Участок наполнения ковша грунтом при толщине стружки  $h = 0,18 \text{ м}$  короче на 10, по сравнению с участком при  $h = 0,15 \text{ м}$ . Вместе с этим затраты энергии и интенсивность наполнения ковша грунтом возрастают. Значения  $k_h$  в конце процесса наполнения на 5,5 % меньше, чем при  $h = 0,15$ .

Наиболее толстая стружка  $h = 0,21 \text{ м}$  обеспечивает интенсивное наполнение в начале цикла копания, однако уже при  $k_h = 0,86$  заполнение становится невозможным из-за нехватки тяговой мощности базового тягача. Продолжительность наполнения ковша при этом минимальна, так как путь набора грунта значительно короче, чем при копании стружками других толщин, а наполнение происходит наиболее интенсивно.

По данным, приведенным в табл. 1 работы скрепера МоАЗ-6014 на прямой стружке с толщинами  $h = 0,15, 0,18$  и  $0,21$  м, работа на стружке толщиной  $h = 0,15$  м будет наиболее производительна при дальности транспортирования свыше 500 м. При дальности транспортирования ниже 500 м наибольший эффект получается от использования стружки с толщиной  $h = 0,18$  м. По мере увеличения дальности транспортирования влияние коэффициента  $k_h$  на производительность увеличивается, а продолжительности наполнения ковша  $t_h$  уменьшается. Следовательно, при выборе оптимальных параметров стружки грунта необходимо учитывать не только тяговые характеристики машины, вместимость ковша и грунтовые условия, но еще и дальность перевозки грунта.

Таблица 1

**Значения сменной эксплуатационной производительности скрепера МоАЗ-6014 в зависимости от дальности транспортирования при работе на прямой форме стружки различных толщин**

Дальность транспортирования грунта, м	Сменная эксплуатационная производительность скрепера, $\text{м}^3/\text{с}$		
	при толщине стружки 15 см	при толщине стружки 18 см	при толщине стружки 21 см
300	3021,4	3068,6	2190,6
400	2436,3	2444,1	1722,9
500	2046,2	2030,8	1419,7
600	1755,6	1737,1	1207

При работе с использованием прямой формы вначале процесса наполнения ковша имеется большой запас окружного усилия на ведущих колесах скрепера, обеспечивающего возможность копания грунта на повышенной скорости 5,2 км/ч. Однако в конце процесса тяговой мощности недостаточно, чтобы заполнить ковш полностью, так как величина общего сопротивления превышает окружное усилие на ведущих колесах скрепера.

Копание клиновой стружкой (рис. 4) характеризуется более полным использованием тяговой мощности на всех стадиях копания. Вначале на-

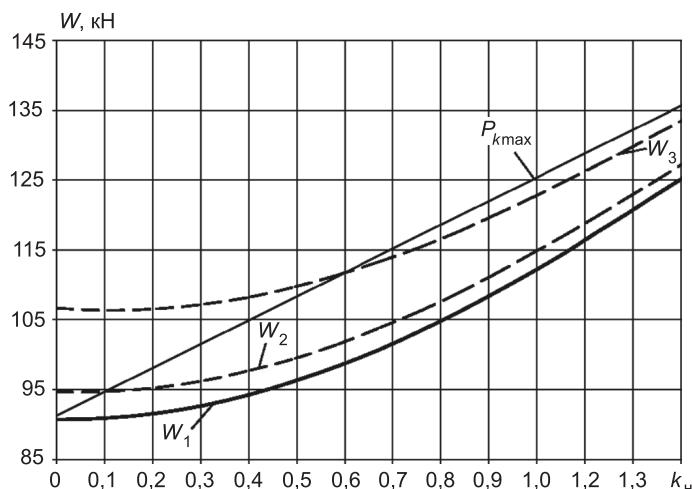


Рис. 4. Зависимость между сопротивлением и коэффициентом наполнения ковша скрепера МоАЗ-6014 при работе клиновой формой стружки

$P_{k\max}$  — максимальное окружное усилие на ведущих колесах (1-я передача);  $W_1, W_2, W_3$  — общее сопротивление на 1, 2 и 3-й передаче соответственно

полнения ковша значения сопротивлений наполнению ковша и перемещению призмы волочения незначительны, что создает возможность использования тяговой мощности и копания более толстой стружкой до  $h = 0,30$  м с преодолением большего сопротивления резанию. Поэтому наполнение необходимо производить на 1-й передаче (средняя скорость движения при этом 3,9 км/ч). К концу процесса наполнения необходимо снижать толщину срезаемой стружки на 0,009 см после прохождения каждого метра пути набора, чтобы продолжить дальнейшее наполнение ковша грунтом. Максимальный коэффициент наполнения ковша грунтом достигается при толщине стружки не менее  $h = 0,14$  м. При меньшей толщине весь срезаемый объем грунта будет уходить в призму волочения и боковые валики, остающиеся после прохода скрепера.

В табл. 2 представлены значения сменной эксплуатационной производительности и продолжительности наполнения ковша скрепера. Расчеты произведены для скрепера ДЗ-87-1А с геометрической вместимостью ковша 5 м<sup>3</sup>, самоходного скрепера МоАЗ-6014 с ковшом 8,2 м<sup>3</sup> и самоходного скрепера МоАЗ-6007 с вместимостью ковша 10 м<sup>3</sup>. Скреперы работали на грунте II категории (средний суглинок). Дальность транспортирования составляла 600 м.

Таблица 2

**Значения сменной эксплуатационной производительности и продолжительности наполнения ковшей скреперов при дальности транспортирования 600 м**

Модель скрепера	Производительность, м <sup>3</sup> /см		Продолжительность наполнения ковша, с	
	прямая стружка	клиновая стружка	прямая стружка	клиновая стружка
ДЗ-87-1А с ковшом вместимостью 5 м <sup>3</sup>	586	683	7,26	6,4
МоАЗ-6014 с ковшом вместимостью 8,2 м <sup>3</sup>	1513	1851	8,4	6,74
МоАЗ-6007 с ковшом вместимостью 10 м <sup>3</sup>	1692	2218	8,6	7,4

Применение клиновой стружки позволяет повысить производительность на 16,5 % для скрепера ДЗ-87-1А, на 22,34 % для скрепера МоАЗ-6014 и 31,08 % для скрепера МоАЗ-6007. Рост производительности обеспечен за счет увеличения коэффициента наполнения ковша и сокращения продолжительности рабочего цикла машины. Кроме того, можно отметить, что эта форма стружки позволяет использовать тяговую мощность скреперных тягачей наиболее полно в течение всей операции наполнения ковша скрепера. При этом сглаживается «пик» мощности, который возникает в конце процесса наполнения.

При сравнении скреперов разных размерных групп выявлено, что с увеличением вместимости ковша эффективность использования клиновой формы стружки возрастает.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Пермяков, В.Б. Комплексная механизация строительства [Текст] / В.Б. Пермяков. — М. : Высш. шк., 2005. — 384 с.
- Алексеева, Т.В. и др. Дорожные машины. Ч. I : Машины для земляных работ. (Теория и расчет) [Текст] / Т.В. Алексеева. — М. : Машиностроение, 1964. — 504 с.
- Артемьев, К.А. Скреперы (Теория наполнения ковша скрепера грунтом) [Текст] / К.А. Артемьев. — Новосибирск : Сибстрин, 1977. — 113 с.

*ПЕРМЯКОВ В.Б., д-р техн. наук, проф.  
Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ),  
г. Омск  
СЕМЕНОВ А.С., асп.  
Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ),  
г. Омск*

Получено после доработки 28.02.11

**Permyakov V.B.**, doctor of technical sciences, professor, Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI), Omsk, Russia

**Semenov A.S.**, post-graduate student, Siberian State Automobile and Highway Academy (SibADI), Omsk, Russia

### **ANALYTICAL DEFINITION OF OPTIMUM PARAMETERS OF THE SHAVING OF THE GROUND CUT OUT BY SELF-PROPELLED SCRAPERS**

In article the method of definition of optimum technological parameters of work of a scraper, such as working speed, the form and a thickness of a cut out shaving is short described. Shown practical implementation method for example 3-scrapers of various size groups. In article comparison of two geometrical forms of shavings intended for work on a ground of II category is made.

**Key words:** road building, scraper, straight shaving, wedge shaving, working speed, thickness shaving, productivity.

#### REFERENCES

1. Permyakov, V.B. Complex mechanization of building [Text] / V.B. Permyakov. — M. : Higher school, 2005. — 384 p.
  2. Alekseeva, T.V. and others. Road machines. Part I : Machines for Earthworks. (Theory and calculation) [Text] / T.V. Alekseeva. — M. : Mashinostroenie, 1964. — 504 p.
  3. Artemiev, K.A. Scrapers (Theory of filling scraper bowl) [Text] / K.A. Artemiev. — Novosibirsk : publishing house of Sibstrin, 1977. — 113 p.
-

## НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

УДК 711.437

Г.И. ПУСТОВЕТОВ, Е.Н. ЛИХАЧЕВ

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ЭКОЛОГИЗАЦИИ ОБЪЕКТОВ СЕЛЬСКОЙ СРЕДЫ

Сельская среда рассматривается как динамически развивающаяся система, включающая природные, архитектурно-планировочные, инженерно-технические и социальные подсистемы. Одной из форм развития сельской архитектуры является архитектурно-экологическая реабилитация сельскохозяйственных территорий, поселений, комплексов, зданий, сооружений, основанная на принципах энергобиологического комплекса.

**Ключевые слова:** уровни организации сельской среды, факторы экологического воздействия, энергобиологический комплекс, архитектурно-планировочные приемы.

Все в традиционном сельскохозяйственном производстве и жизненном укладе села подчинено естественным природным циклам. Сельской среде свойственна органическая децентрализация планировочной структуры территории, которая распадается на планировочные районы и отдельные хозяйства с собственной регуляцией и естественными циклами воспроизводства. В процессе интенсификации хозяйственной деятельности человека в аграрной сфере антропогенные воздействия вносят существенные изменения в естественный ландшафт и природные циклы воспроизводства. На экологическое состояние сельских населенных пунктов влияют факторы неблагоприятного воздействия на окружающую среду.

Производственно-технологические факторы воздействия связаны с различными видами вредных производственных отходов сельскохозяйственных предприятий. По источнику происхождения они разнообразны — отходы животноводства, птицеводства, газы, пыль, шум и т.д. Основными направлениями уменьшения и устранения производственных вредностей являются технические мероприятия и архитектурно-планировочные решения (ориентация зданий, зонирование, организация санитарных барьеров). Другой вид загрязнения окружающей среды — применение минеральных и органических удобрений и гербицидов, используемых в растениеводстве. Ограничение их применения решается путем внедрения новых технологий. Одно из направлений экологизации сельских поселений — возврат к традициям учета природных процессов данной местности при формировании жилой и производственной среды. Хозяйственная деятельность человека должна стать органичной частью естественных циклов: геоценоза и биоценоза, социогенеза и ноогенеза. Достижение экологического равновесия между искусственной и естественной средой обитания человека является идеалом и приобретает особую важность в контексте стремительной утраты жизненно важных и невозобновимых ресурсов планеты, к которым

относятся и сельскохозяйственные земли. Базовый процесс экологизации — способность территории к сохранению и саморегуляции, рациональное и грамотное ее развитие в целях обеспечения высокого уровня жизни в пределах хозяйственной емкости экосистемы. Роль архитектурно-планировочных решений агропромышленных комплексов, зданий и сооружений в оздоровлении среды, безусловно, очень велика, но наибольшая эффективность достигается в единстве с техническими и технологическими решениями (герметичность технологического оборудования, трубопроводов и приборов, обеспечивающих устранение утечек жидкостей, газов, пыли, очистка воздуха и т.д.) [1].

Бытовые отходы в селитебных зонах поселков могут быть утилизированы, переработаны и использованы внутри поселка без каких-либо выбросов в окружающую среду. Для этого существует комплекс биологических, технических и технологических мероприятий (использование в архитектуре энергоактивных частей зданий и сооружений, включение в застройку теплиц, зимних садов и оранжерей, сооружение ветроэнергетических объектов, включение в застройку микробиологических реакторов, биотуалетов, устройство очистных канализационных устройств и т.д.). Для организации эффективного сельскохозяйственного производства и комфортной среды жизнедеятельности человека требуется освоение как новых территорий, так и реабилитация уже освоенных, но неблагоприятных в экологическом отношении территорий.

Архитектурно-планировочная организация сельскохозяйственных территорий выполняется по специальному проекту, который включает решение следующих задач (по методике ЦНИИЭПГраждансельстроя):

1. Формирование производственной и социальной инфраструктуры, куда входят: размещение производственных объектов; организация дорожно-транспортной сети; формирование системы инженерных коммуникаций; организация системы зон и объектов рекреаций; совершенствование планировочной структуры поселков.

2. Оздоровление социально-демографической ситуации и повышение жизненного стандарта людей: совершенствование структуры поселений; территориальная организация производственной базы (предприятий, полей, лугов и т.д.); формирование системы комплексного обслуживания сельского населения.

3. Повышение экологических и эстетических качеств сельской среды: экологически ландшафтная оценка территории с выделением ценных и нарушенных территорий; определение задач по восстановлению нарушенных территорий; мероприятия по охране памятников истории, культуры и природы; выделение охранных зон; мероприятия по повышению эстетических качеств естественного и антропогенного ландшафтов.

В детальной экологической проработке нуждаются и проекты генеральных планов сельских поселений, и проекты индивидуальных усадеб (крестьянской, фермерской, усадьбы в садово-огороднических пригородных кооперативах), а также проекты сельскохозяйственных зданий — производственных, обслуживающих и жилых. Решение проблем экологии сельской территории должно решаться в комплексе с другими вопросами организации среды на четырех уровнях:

— *территориальном* (муниципальный округ; территория сельскохозяйственного предприятия — ОАО, ЗАО, колхоз, кооператив, артель, лесничество, заповедник);

— *градостроительном* (поселок, хутор, станица);

— *планировочном* (фермерское хозяйство, крестьянская усадьба);

— *объектном* (здания, сооружения и их различные сочетания).

Изучение отечественного опыта организации крестьянской усадьбы показывает, что вопросы экологии — переработки отходов, использования ветровой, солнечной и водной энергии в быту и производстве решались органично на основе приемов разумного ведения хозяйства и сельского быта. Современная зарубежная наука и техника достигли высокого уровня в агротехнологиях (мостовая технология земледелия, автоматизированные вертикальные теплицы, автоматический полив с помощью компьютерных технологий, солнечные коллекторы, батареи, ветроэнергетические установки, новые способы переработки отходов и др.). В этой связи в современной практике проектирования объектов сельской среды следует соединять исторический опыт и современные достижения научно-технического прогресса, используя *концепцию формирования сельской среды по принципам энергобиологического комплекса* (ЭБК) [2]. Основные принципы энергобиологического комплекса реализуются при следующих условиях.

Во-первых, при сбалансированном взаимодействии на одной территории или в одном хозяйстве различных отраслей сельскохозяйственного производства, при котором отходы одного производства являются сырьем для другого, в результате чего достигается безотходность всего комплекса производства. Наибольший эффект дает сбалансированное сочетание различных отраслей производства с предприятиями по переработке и утилизации отходов, а также с предприятиями народных промыслов.

Во-вторых, необходимо использование природных источников энергии для нужд сельскохозяйственного производства и ведения приусадебного хозяйства и бытовых нужд. Основные природные источники энергии: энергия солнца, энергия ветра, движение воды, термальные воды, тепло земли, биогаз как побочный компонент переработки зеленой массы и навоза. Их использование обеспечивает экономию традиционных видов топлива — электричества, газа, угля, дров, торфа, нефти, мазута и, являясь совершенно чистыми в экологическом отношении, они способствуют формированию комфортной сельской среды. Применение природных источников энергии требует включения в архитектурную композицию поселения, усадьбы, дома целого ряда сооружений, специфичных по содержанию и форме, таких как солнечные батареи и коллекторы, ветроэнергетические установки, малые гидростанции и водяные мельницы, микробиологические реакторы (метантенки). Все большее распространение получает прямое использование солнечной энергии для обогрева помещений жилых домов, а также теплиц, зимних садов, оранжерей, входящих в структуру жилого дома. В северных странах Финляндии, Швеции и Норвегии почти все новое строительство жилья предусматривает включение в структуру жилых малоэтажных домов, комнат, обогреваемых солнечным теплом. Остекленные веранды или террасы вносят своеобразие в композицию фасадов домов и приближают человека к природе. В холодный период они используются как холодные кладовые, весной и осенью — как теплые комнаты, а в жаркое время как открытые террасы. Образовано целое направление в жилой архитектуре — «солнечные дома» [3].

В-третьих, необходимо применение экологически чистых материалов, конструкций и изделий в архитектуре зданий и сооружений. Данный принцип энергобиологического комплекса — отражение издержек научно-технического прогресса, когда использование пластмасс, различных смол, асбеста, битума, лаков и красок, ковровых и стеновых отдельных материалов на синтетической основе привело к неблагоприятным воздействиям на человека. Фундаментальным принципом организации современной сельской среды является применение традиционных приемов ис-

пользования форм живой природы в планировке и застройке усадеб, включение ее в архитектуру зданий. Данный принцип организации среды относится к вопросам эстетического, духовного возрождения сельской среды и связан с воссозданием лучших традиций организации сельских поселений, архитектуры крестьянских усадеб, улиц, площадей в современных условиях. Те стандартные, шаблонные и в целом безликие архитектурно-строительные приемы и средства, которые применялись на селе в последние десятилетия, необходимо преодолеть, создавая среду, приносящую положительные эмоции. Учет национальных традиций и обычаев, климата, микроклимата и окружающего ландшафта способствует обогащению сельской архитектурной среды. Указанные выше принципы энергобиологического комплекса должны реализовываться на всех уровнях организации сельской среды — территориальном, градостроительном, планировочном, объектном. На каждом из этих уровней имеются приоритетные задачи ЭБК, которые принципиально важно решить именно на этом уровне.

1. Экологизация среды сельских поселений *на территориальном уровне* основывается на принципах:

- сбережения ценных сельскохозяйственных земель (использование надземных и подземных сооружений, застройка территорий, не пригодных для сельскохозяйственного использования);
- биоадаптивности (создания и сохранения возможности пребывания диких животных в собственных естественных «нишах»);
- сохранения экологического каркаса (буферный принцип зонирования территорий, отвечающий принципу экологического равновесия, устройство «зеленых коридоров»);
- создания возможностей естественного восстановления используемых и освоение новых сельскохозяйственных территорий;
- приоритета экотранспортных систем;
- регулирования плотности сельского поселения, которая не должна быть постоянной величиной, так как это приводит к монотонности и однообразию жилой среды (формирование зонального распределения плотности населения по принципу близости к центрам социально-функциональной среды).

В соответствии с обозначенными принципами необходимо:

- а) определение процентного соотношения территорий по отраслям сельскохозяйственного производства и места размещения предприятий агропромышленного комплекса;
- б) определение мест размещения поселений;
- в) размещение и компоновка основных транспортных и инженерных коммуникаций;
- г) экологическое зонирование производственных, жилых, общественных и рекреационных зон территории;
- д) определение зон и мест размещения энергетических зон, устройств и их влияние на ландшафт и архитектуру.

2. Экологизация сельских поселений *на уровне архитектурно-планировочной организации сельских поселений* основывается на принципах:

- энергоактивности (разработка развернутой системы источников энергии);
- проницаемости (искусственно созданной среды сельских поселений для воды, света, воздуха, энергетических потоков);
- территориальной сомасштабности искусственной и естественной среды сельского поселения;
- полифункционального зонирования.

Реализации указанных принципов должны служить следующие задачи:

- а) экологическое зонирование сельского поселения;
- б) соотношение зон и объектов индивидуального, группового и кол-лективного использования;
- в) определение методов очистки и утилизации производственных, транспортных и бытовых отходов;
- г) определение приемов ландшафтной организации и озеленения по-селка в целом и его отдельных структурных элементов;
- д) функциональное зонирование и разработка проблемы создания ар-хитектурного ансамбля;
- е) разработка энергетических установок, методов и устройств для утилизации отходов;
- ж) использование в архитектуре экологически чистых конструкций и материалов.

3. Экологизация сельских поселений *на уровне функциональной и архитектурно-планировочной организации объектов сельской среды* основывается на принципах:

- приоритета энергосберегающих объемно-планировочных и конст-руктивных решений;
- полифункциональной организации объектов сельской среды;
- сомасштабности объектов искусственной и естественной среды, «природоподобия» искусственных объектов (принципы бионики);
- использования естественных экологических материалов;
- дифференцированного сбора отходов, экопереработки отходов.

Приоритетными задачами проектирования сельской среды *на уровне функциональной и архитектурно-планировочной организации* являются:

- а) зонирование внутреннего пространства по комфортности (тепло-вое зонирование);
- б) использование и слияние в единый архитектурный образ энерго-активных частей зданий и сооружений;
- в) выявление роли и места в архитектуре объекта зимнего сада, теп-лицы, оранжереи, аквариума и других элементов живой природы;
- г) методы утилизации бытовых отходов.

**Выводы.** 1. Одна из возможных форм развития сельской архитекту-ры — архитектурно-экологическая реабилитация сельскохозяйственных терри-торий, поселений, комплексов, зданий, сооружений, основанная на принципах энергобиологического комплекса.

2. Основные принципы организации сельской среды на основе энер-гобиологического комплекса: сбалансированное сочетание различных от-раслей сельхозпроизводства, обеспечивающее безотходность и экологи-ческую чистоту и соответствующий этому архитектурный ансамбль; ис-пользование природных источников энергии для производства и быта; приме-нение экологически чистых материалов, конструкций, изделий; ис-пользование в проектах архитектурно-экологической реабилитации сель-ской среды традиций народной архитектуры, природных форм и элемен-тов живой природы в архитектуре.

3. Дальнейшее уточнение приоритетных задач на каждом уровне орга-низации сельской среды. Для достижения экологического равновесия должны выполняться следующие условия:

- воспроизведение основных компонентов природной среды, обес-печивающих их баланс на уровне межрайонных взаимодействий;
- соответствие геохимической активности ландшафтов масштабам про-изводственных и коммунально-бытовых загрязнений окружающей среды;

- соответствие биохимической активности экосистемы уровню антропогенных загрязнений;
- соответствие уровня физической устойчивости ландшафтов силе воздействия транспортных, инженерных, рекреационных и других антропогенных нагрузок.

Природная среда современных сельских поселений нуждается в экологической реставрации, суть которой сводится к проведению следующих мероприятий:

- охрана основных компонентов природной среды: почвенно-растительного покрова и животного мира, сохранение особо ценных ландшафтов;
- создание сложных высокопродуктивных комплексов сельскохозяйственного производства;
- обеспечение разнообразия и мозаичности ландшафта; конструирование среды «по образу и подобию» существования природного ландшафта в динамике естественных экологических циклов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Швец, А.А. Разработка критерииев экологической безопасности жилых зданий и мероприятия по ее обеспечению [Текст] : Автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.А. Швец. — М., 1996.
2. Новиков, В.А. Архитектурная организация сельской среды [Текст] : учеб. пособие / В.А. Новиков, Г.И. Пустоветов. — Новосибирск : НГАХА, 1998.
3. Разработка энергосберегающих зданий для сельского строительства [Текст] / И.Н. Иванов, С.К. Саркисов и др. — М. : Гос. ком. по землеустройству, 2000.

*ПУСТОВЕТОВ Г.И., д-р архит., проф.*

*Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия*

*ЛИХАЧЕВ Е.Н., канд. архит., проф.*

*Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия*

Получено 21.03.11

**Pustovetov G.I.**, doctor of architecture, professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

**Likhachev E.N.**, candidate of architecture, professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Fine Arts, Russia

#### **MODERN TRENDS OF ECOLOGIZATION OF RURAL ARCHITECTURAL OBJECTS**

Rural environment is now considered as a dynamically developing system including natural, architectural, planning, technical and social subsystems. Architectural and ecological rehabilitation of agricultural territories, settlements, complexes, buildings and other constructions which is based on energetic and biological complex principles, is now one of the forms of development of rural architecture.

**Key words:** levels of organization of rural environment, factors of ecological effects, energetic and biological complex, architectural and planning techniques.

#### REFERENCES

1. Shvets, A.A. Elaboration of safety criteria of residential construction and other security activities [Text] : dissertation abstract / A.A. Shvets. — M., 1996.
2. Novikov, V.A. Rural placemaking [Text] : schoolbook / V.A. Novikov, G.I. Pustovetov. — Novosibirsk : NSAAFA, 1998.
3. Elaboration of energy-saving structures for rural building [Text] / I.N. Ivanov, S.K. Sarkisov and others. — M., 2000.

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 621.833

А.Б. ВИНОГРАДОВ, С.А. ВИНОГРАДОВ

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КОНТАКТА ПРИ ЛИНЕЙНОМ КАСАНИИ ВЗАИМООГИБАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Излагается дифференциальный метод определения скорости контакта по огибаемой и огибающей поверхности. Предложенным методом произведено исследование скорости перемещения контакта по поверхности зуба колеса в ортогональной глобоидной передаче с исходным цилиндрическим эвольвентным колесом.

Ключевые слова: дифференциальный метод, скорость перемещения контакта, глобоидная передача.

Для оценки условий смазки и износа контактирующих поверхностей зубчатых передач наряду с характеристиками геометрии контакта важно иметь данные о скорости перемещения контакта по этим поверхностям. Теория гидродинамической смазки предписывает определять эту скорость в направлении, перпендикулярном касательной к контактной линии. При исследовании износостойкости скорость перемещения контакта по рабочей поверхности рассчитывают в направлении относительной скорости скольжения. В общем случае линейного касания взаимоогибаемых поверхностей расчет скорости контакта по огибаемой поверхности не-трудно произвести, если иметь уравнение контактных линий на этой поверхности. Однако, если требуются данные о скорости контакта по огибающей поверхности, задача оказывается сложной из-за обычно громоздких уравнений этой поверхности.

В статье рассматривается дифференциальный метод, с одинаковой простотой пригодный для определения скорости контакта как по огибающей, так и огибаемой поверхности.

Суть метода заключается в том, что элемент перемещения контакта по огибающей или огибаемой поверхности рассчитывается в неподвижной системе координат.

Предположим, имеются две взаимоогибаемые поверхности  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , контактирующие между собой по пространственной кривой  $M-M$ . Выберем три ортогональные системы координат:  $x_1, y_1, z_1$ , жестко связанную с поверхностью  $\Pi_1$ ; систему  $x_2, y_2, z_2$ , жестко связанную с поверхностью  $\Pi_2$ ; неподвижную систему  $x, y, z$  (рис. 1).

Пусть движение поверхности  $\Pi_1$  относительно неподвижной системы координат характеризуется уравнением

$$S_1 = S_1(x, y, z, \varphi_1) \quad (1)$$

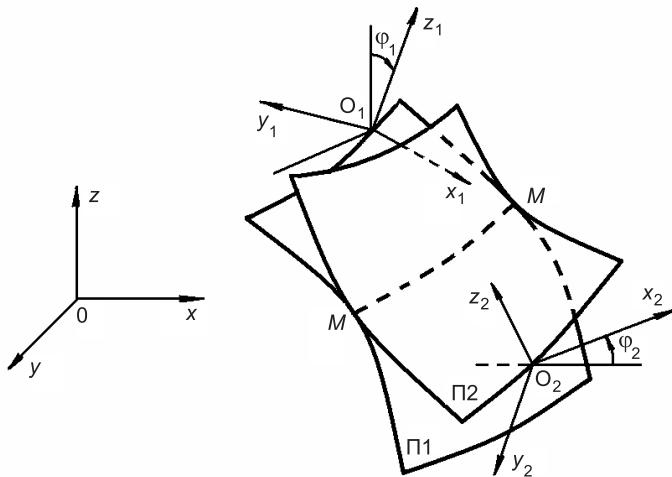


Рис. 1. Расчетная схема

и уравнением обратного перехода

$$S = S(x_1, y_1, z_1, \varphi_1). \quad (2)$$

Здесь  $S_1$  и  $S$  — радиус-вектор точки соответственно в системе  $x_1, y_1, z_1$  и системе  $x, y, z$ ;

$\varphi_1$  — параметр, характеризующий относительное движение.

Движение поверхности  $\Pi_2$  относительно неподвижной системы координат будем характеризовать уравнением

$$S_2 = S_2(x, y, z, \varphi_2) \quad (3)$$

и уравнением обратного перехода

$$S = S(x_2, y_2, z_2, \varphi_2). \quad (4)$$

Здесь  $S_2$  — радиус-вектор точки в системе  $x_2, y_2, z_2$ ;

$\varphi_2$  — параметр, характеризующий относительное движение.

Важной характеристикой относительного движения подвижных систем является связь между параметрами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . При наиболее простой линейной зависимости между ними выражения для первой и второй дифференциальных характеристик [1] имеют вид:

$$\frac{d\varphi_2}{d\varphi_1} = \frac{d\varphi_2}{dt} / \frac{d\varphi_1}{dt} = u;$$

$$\frac{d^2\varphi_2}{d\varphi_1^2} = \frac{du}{d\varphi_1} = 0,$$

где  $u$  — носит название передаточного отношения.

В этом случае интегральной характеристикой будет

$$\frac{\varphi_2}{\varphi_1} = u. \quad (5)$$

Для простоты дальнейшего изложения принимаем  $u = \text{const}$ .

Выражения (1)–(5) дают возможность установить связь между дифференциальными элементами взаимоогибаемых поверхностей. Пусть далее  $F_1(x, y, z) = 0$  — уравнение огибающей поверхности  $\Pi_1$ . Выражение для контактной линии на этой поверхности можно представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} F_1(x, y, z) &= 0; \\ f_{1x}(x_1, y_1, z_1, u, \varphi_1) \frac{\partial z_1}{\partial x_1} + f_{1y}(x_1, y_1, z_1, u, \varphi_1) \frac{\partial z_1}{\partial y_1} &= f_{1z}(x_1, y_1, z_1, u, \varphi_1), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где второе уравнение — уравнение связи между координатами точки и параметром относительного движения  $\varphi_1$ . Функции  $f_{1x}$ ,  $f_{1y}$  и  $f_{1z}$  представляют множители так называемого дифференциального комплекса [2].

Переписывая (6) при помощи формулы (1), получаем уравнение контактных линий в неподвижной системе координат, называемое уравнением поверхности зацепления:

$$\left. \begin{aligned} F(x, y, z) &= 0; \\ f(x, y, z, u, \varphi_1) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Дифференцируем это уравнение по координатам и параметру  $\varphi_1$ . Исключая  $d\varphi_1$ , записываем выражение для элемента поверхности зацепления:

$$Adx + Bdy + Cdz = 0. \quad (8)$$

Предположим, необходимо определить скорость точки контактной линии по огибающей поверхности в направлении, перпендикулярном касательной к контактной линии. Для этого дифференцируем по координатам и параметру  $\varphi_2$  уравнение (4):

$$dS = dS(dx_2, dy_2, dz_2, d\varphi_2, x_2, y_2, z_2, \varphi_2). \quad (9)$$

В выражении (9) координаты  $x_2$ ,  $y_2$  и  $z_2$  заменяем соответствующими значениями этих координат из уравнения (3), а проекции дифференциального элемента поверхности П2 —  $dx_2$ ,  $dy_2$  и  $dz_2$  заменяем их значениями из дифференцированного по координатам уравнения (3):

$$dS_2 = dS_2(dx_{\Pi_2}, dy_{\Pi_2}, dz_{\Pi_2}, \varphi_2).$$

Здесь дифференциалам  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  придан индекс П2, поскольку они выражают элементарное перемещение точки по поверхности П2 в неподвижной системе координат.

В результате подстановки уравнение (9) приводится к виду

$$dS = dS(dx_{\Pi_2}, dy_{\Pi_2}, dz_{\Pi_2}, d\varphi_2, x, y, z, \varphi_2). \quad (10)$$

Если объединить уравнения (8) и (10) в систему

$$\left. \begin{aligned} Adx + Bdy + Cdz &= 0; \\ dS = dS(dx_{\Pi_2}, dy_{\Pi_2}, dz_{\Pi_2}, d\varphi_2, x, y, z, \varphi_2), \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

то получим выражение для элементарного перемещения по поверхности П2, записанное в неподвижной системе координат.

Чтобы выразить элементарное перемещение в направлении, перпендикулярном контактной линии, необходимо и достаточно на зависимость (11) наложить условие в виде дифференциального элемента линии (в точке контакта), представляющего пересечение элементов касательной плоскости и плоскости, нормальной к линии контакта:

$$\left. \begin{aligned} dz_{\Pi_2} &= \frac{\partial z_{\Pi}}{\partial x_{\Pi}} dx_{\Pi_2} + \frac{\partial z_{\Pi}}{\partial y_{\Pi}} dy_{\Pi_2}; \\ T_x dx_{\Pi_2} + T_y dy_{\Pi_2} + T_z dz_{\Pi_2} &= 0. \end{aligned} \right\}$$

Здесь  $\frac{\partial z_{\Pi}}{\partial x_{\Pi}} = \frac{\partial z_{\Pi_1}}{\partial x_{\Pi_1}} = \frac{\partial z_{\Pi_2}}{\partial x_{\Pi_2}}$  и  $\frac{\partial z_{\Pi}}{\partial y_{\Pi}} = \frac{\partial z_{\Pi_1}}{\partial y_{\Pi_1}} = \frac{\partial z_{\Pi_2}}{\partial y_{\Pi_2}}$ .

Поскольку в точке касания взаимоогибаемых поверхностей имеет место общая касательная плоскость, величины  $T_x$ ,  $T_y$  и  $T_z$  пропорциональны косинусам углов, составленных касательной к контактной линии и осями координат.

Итак, совместное решение уравнений системы

$$\left. \begin{aligned} Adx + Bdy + Cdz &= 0; \\ dS &= dS(dx_{\Pi_2}, dy_{\Pi_2}, dz_{\Pi_2}, d\varphi_2, x, y, z, \varphi_2); \\ dz_{\Pi_2} &= \frac{\partial z_{\Pi}}{\partial x_{\Pi}} dx_{\Pi_2} + \frac{\partial z_{\Pi}}{\partial y_{\Pi}} dy_{\Pi_2}; \\ T_x dx_{\Pi_2} + T_y dy_{\Pi_2} + T_z dz_{\Pi_2} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

относительно  $dx_{\Pi_2}$ ,  $dy_{\Pi_2}$  и  $dz_{\Pi_2}$  позволяет выразить интересующее нас перемещение:

$$dS_{\Pi_2} = \sqrt{dx_{\Pi_2}^2 + dy_{\Pi_2}^2 + dz_{\Pi_2}^2}.$$

При этом если вынести дифференциал  $d\varphi_2$ , то это перемещение можно представить в виде:

$$dS_{\Pi_2} = r_{\Pi_2} d\varphi_2, \quad (12)$$

где  $r_{\Pi_2}$  — множитель, являющийся функцией координат точки, передаточного отношения  $u$  и параметра  $\varphi_2$ .

Но

$$d\varphi_2 = \omega_2 dt, \quad (13)$$

где  $\omega_2 = \frac{d\varphi_2}{dt}$  — угловая скорость.

Подставляя зависимость (13) в выражение (12), получаем формулу для определения мгновенной скорости точки контактной линии в заданном направлении:

$$V_{\Pi_2} = r_{\Pi_2} \omega_2.$$

Аналогичным образом можно получить выражение для скорости контактной точки в заданном направлении по огибающей поверхности:

$$V_{\Pi_1} = r_{\Pi_1} \omega_1, \quad (14)$$

где  $\omega_1$  — угловая скорость звена с поверхностью  $\Pi_1$ .

Данным методом произведено исследование скорости перемещения контакта по поверхности зуба колеса в ортогональной глобоидной передаче с исходным цилиндрическим эвольвентным колесом.

При выбранной системе координат (рис. 2) и однопараметрическом задании эвольвентной винтовой поверхности (огибающей) зуба колеса уравнение поверхности зацепления можно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} x \cos \theta - y \sin \theta &= r_{b1}; \\ -y + z \cos \theta \operatorname{tg} \delta &= r_{w1}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Здесь  $\theta = \varphi_1 + \vartheta$ , ( $\vartheta$  — угловой параметр эвольвентного геликоида);  $r_{b1}$  — радиус основного цилиндра колеса;

$\delta$  — угол наклона образующей эвольвентного геликоида;

$r_{w1}$  — радиус начальной окружности.

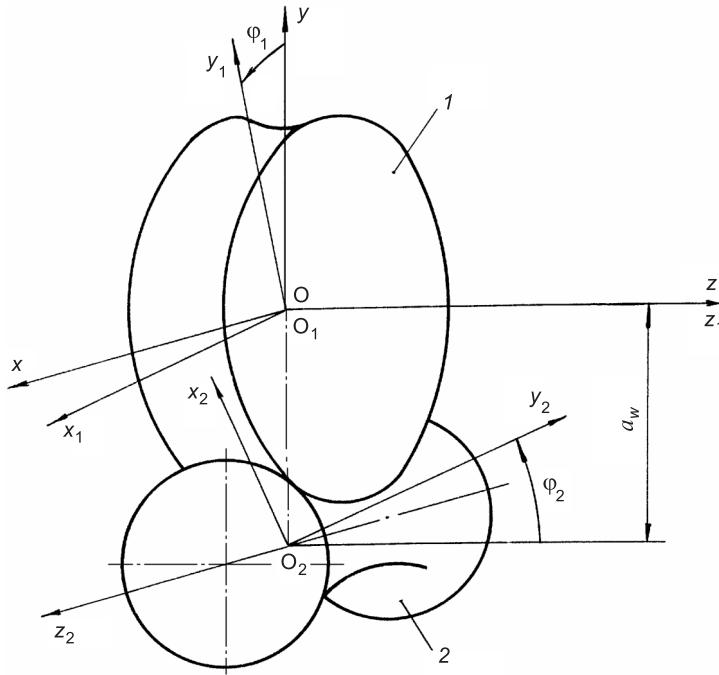


Рис. 2. Система координат передачи

Продифференцировав уравнение (15) по координатам и параметру  $\theta$  и исключив  $d\theta$ , получим дифференциальное уравнение поверхности зацепления:

$$dx + ady + bdz = 0, \quad (16)$$

где  $a = \frac{y \cos^2 \theta + r_{b1} \sin \theta - r_{w1} \sin^2 \theta}{\sin \delta \cos \theta (\cos \theta - a \sin^2 \theta)^2}$ ;  $b = -\operatorname{tg} \delta (\sin \theta + a \cos \theta)$ .

Для перехода от системы  $x_1, y_1, z_1$  к системе  $x, y, z$  имеем

$$\left. \begin{array}{l} x = x_1 \cos \varphi_1 + y_1 \sin \varphi_1; \\ y = -x_1 \sin \varphi_1 + y_1 \cos \varphi_1; \\ z = z_1 \end{array} \right\} \quad (17)$$

и обратно

$$\left. \begin{array}{l} x_1 = x \cos \varphi_1 - y \sin \varphi_1; \\ y_1 = x \sin \varphi_1 + y \cos \varphi_1; \\ z_1 = z, \end{array} \right\} \quad (18)$$

где  $\varphi_1$  — угол поворота колеса.

Путем дифференцирования уравнений (17) и (18) согласно изложенной методике получаем выражение, связывающее элементарное перемещение в неподвижной системе координат с возможным элементарным перемещением точек в системе колеса:

$$\left. \begin{array}{l} dx = dx_k + y d\varphi_1; \\ dy = dy_k - x d\varphi_1; \\ dz = dz_k. \end{array} \right\} \quad (19)$$

Здесь  $dx_k$ ,  $dy_k$ ,  $dz_k$  — проекции возможного элементарного перемещения (в системе колеса), переписанного в неподвижную систему.

Система уравнений (16) и (19) выражает возможное элементарное перемещение по зубу колеса в неподвижной системе координат.

Дифференцирование уравнения поверхности зацепления при фиксированном угле поворота  $\varphi_1$  позволяет найти значения для коэффициентов

$$\left. \begin{array}{l} T_x = \frac{T_y \sin \theta \cos \theta + y + r_{b1} \sin \theta}{\cos^2 \theta}; \\ T_y = -r_{b1} \sin^2 \delta \sin \theta; \\ T_z = \frac{T_y \cos \theta + (y + r_{w1}) \sin \theta}{\operatorname{tg} \delta \cos^2 \theta}, \end{array} \right\}$$

представляющие величины, пропорциональные косинусам углов между касательной линии и осями координат.

Следовательно,  $T_x dx_k + T_y dy_k + T_z dz_k = 0$  является уравнением элемента плоскости, перпендикулярной касательной к контактной линии.

Поэтому выражение элемента линии в точке контакта имеет вид:

$$\left. \begin{array}{l} dz_k = r_{b1} dx_k + q dy_k; \\ T_x dx + T_y dy + T_z dz = 0, \end{array} \right\} \quad (20)$$

где в первом уравнении элемента касательной плоскости в точке контакта

$$\begin{aligned} p &= -\operatorname{tg} \delta \sin \theta; \\ q &= -\operatorname{tg} \delta \cos \theta. \end{aligned}$$

Итак, система, составленная из уравнений (16), (19), (20)

$$\left. \begin{array}{l} dx + ady + bdz = 0; \\ dx = dx_k + y d\varphi_1; \\ dy = dy_k - x d\varphi_1; \\ dz = dz_k; \\ dz_k = r_{b1} dx_k + q dy_k; \\ T_x dx + T_y dy + T_z dz = 0, \end{array} \right\}$$

выражает перемещение точки линии контакта по зубу колеса в заданном направлении. Решением этой системы уравнений получим формулу для множителя  $r_{\Pi 1}$ , входящего в зависимость (14):

$$r_{\Pi 1} = r_k = \frac{ax - y}{\sqrt{1 + a^2 + b^2}}. \quad (21)$$

Заметим, что при  $\omega_1 = \text{const}$  скорость контакта пропорциональна множителю  $r_{\Pi 1}$  и, следовательно, достаточно исследовать функцию (21), чтобы получить картину изменения самой скорости.

Нами был исследован вариант глобоидной пары с параметрами  $u = 41$ ;  $a_w = 80$  мм и радиусом  $r_{w1}$ , совпадающим с радиусом  $r_1$  делительной окружности колеса. Контактные линии на зубе колеса, построенные через равные интервалы угла  $\varphi_1$  поворота колеса, изображены на рис. 3, а. Углы  $\varphi_1 = 107^\circ$  и  $\varphi_1 = 116^\circ$  соответствуют входу витков червяка в зацепление: углы  $\varphi_1 = 63^\circ$  и  $\varphi_1 = 72^\circ$  — выходу.

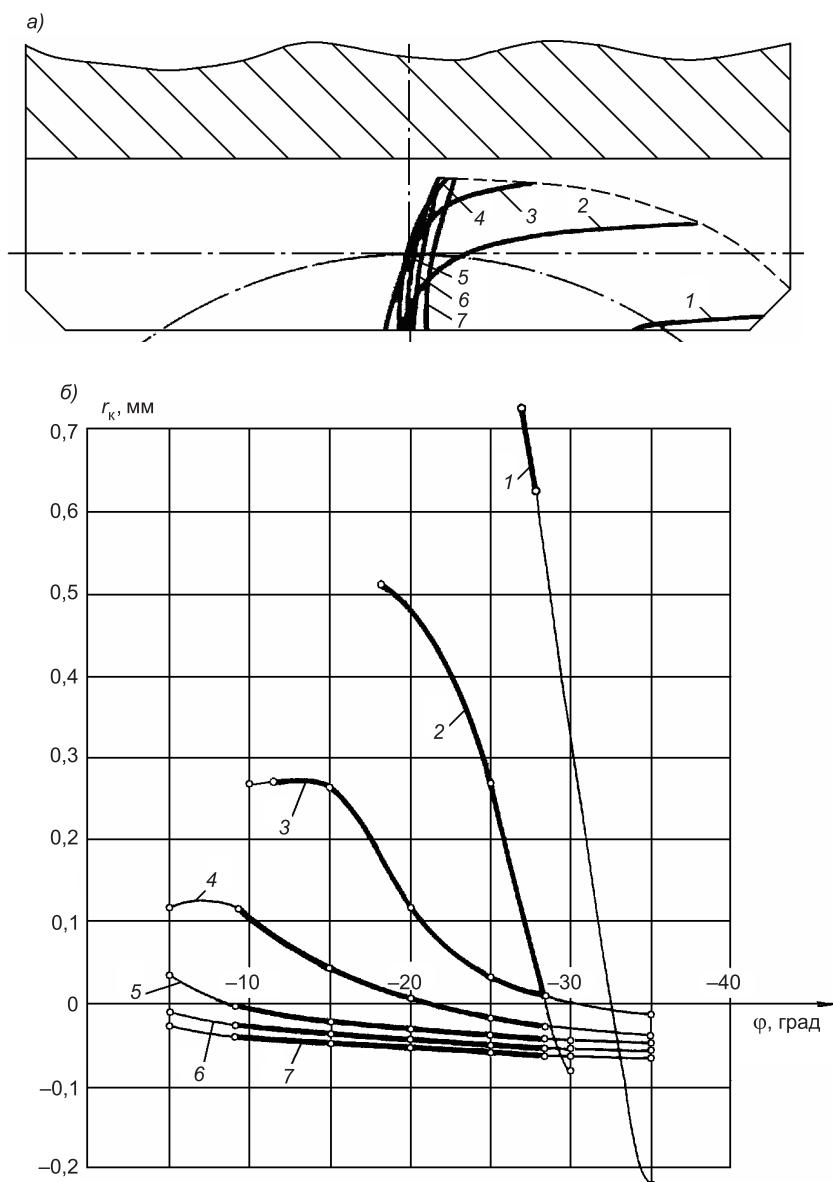


Рис. 3. Картинка изменения в зависимости от положения контактной точки на зубе колеса  $\varphi_i$  равно соответственно:

1 — 116°, 2 — 107°, 3 — 98°, 4 — 90°, 5 — 81°, 6 — 72°, 7 — 63°

На рис. 3, б показан характер изменения множителя  $r_k$  в масштабе 1: $\omega_1$  скорости перемещения контакта  $V_k$ . Можно видеть, что действительно скорости точек контактных линий на входе максимальны, а на выходе минимальны и даже противоположны по направлению. Последнее означает, что данный вариант имеет неблагоприятную зону зацепления на выходе, где наблюдается двукратное воздействие контакта на поверхности зуба колеса.

Таким образом, если изображение контактных линий позволяет представить характер скорости перемещения точек по поверхности, то изложенный метод дает возможность оценить эту скорость численно с высокой степенью точности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колчин, Н.И. Аналитические основы дифференциального исследования зубчатых зацеплений [Текст] / Н.И. Колчин // Тр. Ин-та машиноведения АН СССР. Семинар по теории машин и механизмов. — 1957. — Т. 16, вып. 64. — С. 26–53.
2. Колчин, Н.И. Обработка винтовых поверхностей эллиптическими и круговыми цилиндрами [Текст] / Н.И. Колчин // Тр. Ленингр. механ. ин-та. — 1962. — № 23. — С. 39–47.

**ВИНОГРАДОВ А.Б.**, д-р техн. наук, проф.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

**ВИНОГРАДОВ С.А.**, студ.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено 14.03.11

**Vinogradov A.B.**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

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

### DEFINITION OF SPEED OF CONTACT SURFACES WITH LINEAR TOUCHES ВЗАИМООГИБАЕМЫХ

Describes the differential method for determining contact velocity on surface ogibaemoj and envelope. The proposed method produced a study on contact surface speed of the wheels in a tooth surface that is perpendicular to the original cylindrical globoidnoj transfer evolventnym wheel.

**Key words:** differential method, contact speed, globoidnoj transmission.

### REFERENCES

1. Kolchin, N.I. Analytical foundations of differential gearing research [Text] / N.I. Kolchin // Works Institute of engineering Academy of Sciences USSR. Seminar on theory of machines and mechanisms. — 1957. — Vol. 16, issue 64. — P. 26–53.
  2. Kolchin, N.I. Processing of screw surfaces elliptic and Crewe govymi cylinders [Text] / N.I. Kolchin // Works Leningrad mechanical Institute. — 1962. — N 23. — P. 39–47.
-

УДК 62.002.51.001.57

А.В. ГРУЗИН, Э.А. АБРАМЕНКОВ

## ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШТАМПОВ С ГРУНТОМ

Рассматриваются обеспечение условий видеосъемки и их параметров: частота съемки; число отснятых кадров; расстояние от видеокамеры до объекта и освещенность объектов съемки в зависимости от технических характеристик используемого оборудования, вида грунта, массогабаритные характеристики модели и скорость ударного взаимодействия.

**Ключевые слова:** скорость съемки, видеокамера, объект съемки, стенд, инструментарий исследований, грунт, штамп.

Для экспериментального изучения процессов взаимодействия модели штампа с грунтом устанавливаются следующие требования [1, 2]:

- визуализация движения модели в грунте и перемещения частиц самого грунта под нагрузкой;
- бесконтактная регистрация движения модели в грунте, деформации грунта и необходимого контроля над всей динамикой исследуемого процесса;
- регистрирование всей динамики процесса с дискретностью между отснятыми кадрами на порядок меньше его длительности протекания с достаточным освещением объектов съемки;
- минимизация влияния стенок на результаты эксперимента при исследовании воздействия на грунт в определенном диапазоне скоростей удара моделей заданных формы, габаритов и массы;
- уменьшение трудоемкости выполнения экспериментальных исследований, снижение материальных затрат и сроков их проведения.

**Расчет линейных размеров модели.** Для выполнения принятых основных положений на первом этапе расчетов необходимо определить линейные размеры модели. Расчет линейных размеров модели является важным вопросом, решение которого непосредственно связано с точностью и экономическими показателями физического моделирования. Применение физического моделирования при исследовании рабочих процессов, связанных с взаимодействием рабочих органов машин с грунтом, приводит к уменьшению трудоемкости выполнения экспериментальных исследований, снижению материальных затрат и сроков их проведения<sup>1</sup>.

Увеличение размеров исследуемых машин обычно связано с увеличением стоимости проведения их натурных испытаний. В ряде случаев приближенно можно считать эти расходы пропорциональными кубу линейных размеров самого оборудования или машины<sup>2</sup>. По этим причинам целесообразно делать геометрические размеры модели возможно мень-

<sup>1</sup> Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. 440 с.

<sup>2</sup> Баловнев В.И. Методы физического моделирования рабочих процессов дорожно-строительных машин. М.: Машиностроение, 1974. 232 с.

шими. Однако уменьшение геометрических размеров модели ограничено главным образом следующими факторами:

- структурной неоднородностью грунта;
- точностью измерительной аппаратуры и методов измерения изучаемых параметров.

Каждый из указанных факторов накладывает свои ограничения на величину масштаба модели. Линейные размеры модели рабочего органа на весного оборудования призматической формы определим на основании равенства<sup>2</sup>

$$V = \frac{B \cdot H^2}{2 \cdot \operatorname{tg} \varphi}, \quad (1)$$

где  $\varphi$  — угол внутреннего трения грунта;

$B$  — линейный размер модели в вертикальной плоскости;

$H$  — линейный размер в горизонтальной плоскости;

$V$  — предельно допустимый объем грунта, взаимодействующего с рабочим органом вытрамбовывающего оборудования, в котором сохраняются характерные свойства разрабатываемой среды, м<sup>3</sup>.

Линейный размер, установленный по предельно допустимому объему грунта, взаимодействующего с рабочим органом вытрамбовывающего оборудования, в котором сохраняются характерные свойства разрабатываемой среды, обосновывается положением, что при числе компонентов, составляющих грунт,  $m \geq 400$  вероятность содержания в данном объеме характерного количества определяющих структуру компонентов близка к достоверности<sup>2</sup> с вероятностью 0,98. Следовательно, установим искомый объем грунта

$$V \geq 200 \cdot d^3, \quad (2)$$

где  $d$  — линейный размер случайных включений для модели грунта, м.

В первом приближении можно принять  $\frac{B}{H} = 3 \div 4$ , тогда

$$V \approx \frac{1}{18} B^3. \quad (3)$$

Масштабный коэффициент  $k_l = \frac{l_h}{l_m}$  вычисляем на основании следующей зависимости:

$$k_l \leq \frac{l_h}{15,4 \cdot d_{\max}}, \quad (4)$$

где  $l_h$  — определяющий линейный размер рабочего оборудования оригинала, м;

$d_{\max}$  — максимальный линейный размер минеральной фракции, м.

Таким образом, минимально допустимый линейный масштаб модели  $M_l = \frac{1}{k_l}$

$$M_l^{\min} = 15,4 \frac{d_{\max}}{l_h}. \quad (5)$$

В качестве исходных данных для расчета максимальных габаритов модели был выбран рабочий орган трамбующей машины ТМ-3/2 [3]. Высота штампа ТМ-3/2 составляет  $l_h = 2$  м. В качестве грунта планируется

Таблица 1

## Гранулометрический состав песка для экспериментальных исследований

	Размер частиц, мм							
	> 10	10–5	5–2	2–1	1–0,5	0,5–0,25	0,25–0,10	< 0,10
Массовая доля фракции $q_i$	0,00	0,00	0,00	0,12	0,35	0,23	0,17	0,13

Средний размер частицы: 0,38 мм

использовать песок средней крупности. Гранулометрический состав песка определен ситовым методом<sup>3</sup> и представлен в табл. 1.

Как видно из приведенных данных, максимальный размер минеральной фракции  $d_{\max} = 0,002$  м, а максимальный масштабный коэффициент  $k_1$

$$k_1^{\max} = \frac{l_h}{15,4 \cdot d_{\max}} = \frac{2}{15,4 \cdot 0,002} \cong 65. \quad (6)$$

Минимальный линейный размер модели соответственно

$$l_m^{\min} = \frac{l_h}{k_1^{\max}} = \frac{2}{65} \cong 0,031 \text{ м}. \quad (7)$$

Таким образом, выбор в качестве модели конуса высотой 0,065 м и диаметром основания 0,045 м правомочен. Находим предельно допустимый объем грунта  $V$ , взаимодействующего с рабочим органом вытрамбовывающего оборудования

$$V = \frac{B \cdot H^2}{2 \cdot \operatorname{tg}\phi} = \frac{0,065 \cdot 0,045^2}{2 \cdot \operatorname{tg}35^\circ} \cong 9,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3. \quad (8)$$

Для проверки условия (2) в качестве линейного размера случайных включений примем средний размер частицы  $d = 0,38 \cdot 10^{-3}$  м:

$$V = (9,4 \cdot 10^{-5}) \geq 200 \cdot d^3 = 200 \cdot (0,38 \cdot 10^{-3})^3 \cong 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3. \quad (9)$$

На основании результатов расчетов (8) и (9) считаем условие (2) выполненным. Следовательно, выбор линейных размеров модели штампа и грунта проведен корректно.

**Расчет габаритов стенда.** Размеры стенда должны обеспечивать возможность рациональной минимизации влияния стенок на результаты эксперимента при исследовании воздействия на грунт в определенном диапазоне скоростей удара моделей заданных формы, габаритов и массы.

Отсутствие однозначных и достоверных данных о распределении сжимающих напряжений в грунте, возникающих в результате ударного воздействия конических моделей на грунт, а также планируемый к исследованию ограниченный диапазон скоростей (до 1,7 м/с) имеющихся моделей позволили в качестве исходного критерия использовать известные зависимости распределения напряжений для случая плоской задачи. Для обеспечения гарантированного исключения влияния стенок корпуса стенда на динамику ударного воздействия модели на грунт в методику расчета параметров стенда предлагается ввести коэффициент влияния  $k_v$ . Согласно имеющимся данным, распределение вертикального сжимающего напряжения, составляющего 10 % от действующей нагрузки, зависит от линейного размера нагрузки и распространяется в направлении, перпен-

<sup>3</sup> ГОСТ 12536–79 (2003). Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.

дикулярном приложению нагрузки на величину, равную удвоенной ее ширине<sup>4</sup>:

$$H_{\text{ст}} \geq 4k_b H, \quad (10)$$

где  $H_{\text{ст}}$  — ширина стенда, м;

$H$  — линейный размер модели в горизонтальной плоскости, м.

В вертикальной плоскости глубина распространения данного напряжения, составляющего 10 % от действующей нагрузки, составляет порядка шести величин ширины нагрузки

$$B_{\text{ст}} \geq 6k_b H, \quad (11)$$

где  $B_{\text{ст}}$  — высота стенда, м.

В качестве светопрозрачного экрана предлагается использовать закаленное стекло, которое обладает следующими основными преимуществами перед другими светопрозрачными материалами:

- в результате специальной термической обработки прочность стекла возрастает в 5–7 раз;
- модуль упругости при изгибе достигает  $E_{\text{ст}} = 250$  МПа;
- обладает повышенной устойчивостью к износу;
- разрушение стекла происходит с образованием многочисленных нетравмоопасных осколков.

В качестве стенда для проведения экспериментальных исследований выбрана коробчатая конструкция шириной  $H_{\text{ст}} = 0,7$  м и высотой  $B_{\text{ст}} = 0,75$  м. Таким образом, для используемой конической модели найдем коэффициент влияния  $k_b$

$$k_b = \frac{B_{\text{ст}}}{6H} = \frac{0,75}{6 \cdot 0,045} \cong 2,8. \quad (12)$$

Предполагается, что коэффициент  $k_b$  обеспечит также возможность перспективных экспериментальных исследований с другими моделями.

**Определение параметров скоростной видеосъемки.** Для регистрации быстропротекающих и кратковременных процессов с целью их исследования применяется скоростная фото-, кино- и видеосъемка [4]. В литературе<sup>5,6</sup> приведены данные по времени внедрения в грунт плоского штампа в зависимости от величины его удельного импульса. Например, для суглинков различной консистенции по данным проф. Н.Я. Хархуты<sup>5</sup> этот диапазон составляет 10 ÷ 95 мс. Так как в научной литературе отсутствуют однозначные рекомендации по необходимому количеству кадров для качественной и количественной оценки ударного воздействия модели на грунт, то было принято решение об использовании скоростной видеосъемки, обеспечивающей регистрацию всей динамики процесса с дискретностью между отснятыми кадрами на порядок меньше длительности его протекания. То есть для регистрации движения модели в грунте необходимо обеспечить скоростную видеосъемку не менее десяти кадров с временной дискретностью 0,001 с [5]. С учетом вышесказанного частота съемки должна достигать 1000 кадр/с. Данным требованиям соответствует скоростная видеокамера ТМС-6740GE с максимальной частотой съемки 1250 кадр/с. Режимы полнокадровой

<sup>4</sup> Механика грунтов, основания и фундаменты / Под ред. С.Б. Ухова. М.: Высш. шк., 2002. 568 с.

<sup>5</sup> Хархута Н.Я. Машины для уплотнения грунтов. Теория, расчет и конструкции. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1973. 358 с.

<sup>6</sup> Тарасов В.Н., Бояркин Г.Н. Теория удара в теоретической механике и ее приложения в строительстве. Омск: ОмГТУ, 2001. 144 с.

Таблица 2  
Режимы съемки камеры  
TMC-6740GE

Режим	Размер кадра (ширина × высота), пиксель	Частота съемки, кадр/с
A	640 × 480	200
B	640 × 160	540
C	224 × 480	500
D	224 × 160	1250

и неполнокадровой съемки камеры TMC-6740GE с различными частотами съемки приведены в табл. 2.

**Расчет параметров объектива видеокамеры.** Основные характеристики фото-, кино- и видеообъективов, влияющие на их выбор, можно подразделить на следующие три основные группы [4]:

- конструктивные (оптические и механические) характеристики (переднее фокусное расстояние  $f$ , диаметр входного зрачка  $D$ , угловое поле в пространстве предметов  $2\omega$  и др.);
- фотометрические характеристики (коэффициент пропускания  $\tau_0$  и др.);
- характеристики качества изображения (угловая разрешающая способность  $\psi$  и др.).

Основная задача расчета параметров объектива скоростной видеокамеры — обеспечение условий съемки с целью получения качественного изображения объекта пространственной формы с заданным линейным разрешением. Таким образом, величина допустимого диаметра кружка нерезкости  $d_{\text{доп}}$  определяется требованиями точности к линейным размерам объекта наблюдения  $d_t$

$$d_{\text{доп}} \leq d_t. \quad (13)$$

Поскольку объектом съемки является пространственная модель, имеющая линейные ортогональные размеры съемки, то для гарантированной регистрации движения всех точек объекта съемки необходимо обеспечить в процессе экспериментальных исследований выполнение условия<sup>6</sup>. Соблюдение этого требования должна обеспечить соответствующая величина глубины резко изображаемого пространства (РИП). Глубиной резко изображаемого пространства (РИП)  $\Delta p$  называется расстояние вдоль оптической оси съемочного объектива, в пределах которого расположенные объекты изображаются на светочувствительном элементе с достаточной степенью резкости<sup>7</sup>:

$$\Delta p = p_z - p_n, \quad (14)$$

где  $p_z$  — расстояния до задней границы РИП, м;

$p_n$  — расстояния до передней границы РИП, м.

Определяем расстояния до задней границы РИП  $p_z$

$$p_z = \frac{Df'p_{\text{нав}}}{Df' - (p_{\text{нав}} - f')d_{\text{доп}}} \approx \frac{Df'p_{\text{нав}}}{Df' - p_{\text{нав}}d_{\text{доп}}}, \quad (15)$$

где  $D$  — диаметр входного зрачка объектива, м;

$f'$  — заднее фокусное расстояние, м;

$p_{\text{нав}}$  — расстояние от плоскости входного зрачка до плоскости наводки, м.

Находим расстояния до передней границы РИП  $p_n$

$$p_n = \frac{Df'p_{\text{нав}}}{Df' + (p_{\text{нав}} - f')d_{\text{доп}}} \approx \frac{Df'p_{\text{нав}}}{Df' + p_{\text{нав}}d_{\text{доп}}}. \quad (16)$$

<sup>7</sup> Кулагин С.В., Гоменюк А.С., Дикарев В.Н. и др. Оптико-механические приборы. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1984. 352 с., ил.

Подставляя формулы (15) и (16) в уравнение (14), вычисляем глубину РИП

$$\Delta p = p_3 - p_n \cong \frac{p_{\text{нав}}^2 \cdot d_{\text{доп}}}{D \cdot f'}. \quad (17)$$

Поскольку регистрацию ударного воздействия модели на грунт предполагается производить с расстояния, исключающего повреждение объектива и видеокамеры частицами грунта и обеспечивающего минимальное вибрационное воздействие удара на процесс съемки, то с достаточной степенью точности можно принять следующее условие:

$$p_{\text{нав}} \cong l_{\text{набл}}, \quad (18)$$

где  $l_{\text{набл}}$  — расстояние наблюдения от передней поверхности объектива видеокамеры до объекта съемки, м.

Тогда глубина РИП

$$\Delta p = 2 \frac{l_{\text{набл}}^2 \cdot d_{\text{доп}}}{D \cdot f'}. \quad (19)$$

Как правило, все объективы снабжены диафрагмой — устройством для регулировки относительного отверстия, которое позволяет изменять количество проходящего через объектив света, а также устанавливать необходимую глубину резкости, т.е. регулировать глубину РИП. Поэтому с учетом равенства<sup>8</sup>

$$\frac{1}{K_r} = \frac{D}{f'}, \quad (20)$$

где  $K_r$  — диафрагменное число, уравнение (19) будет иметь следующий вид:

$$\Delta p = 2 \frac{l_{\text{набл}}^2 \cdot d_{\text{доп}} \cdot K_r}{D \cdot f'^2}. \quad (21)$$

Рассчитаем максимальное расстояние наблюдения  $l_{\text{набл}}$

$$l_{\text{набл}}^{\max} = \sqrt{\frac{\Delta p \cdot f'^2}{2 \cdot d_{\text{доп}} \cdot K_r}}. \quad (22)$$

Линейные размеры поля наблюдения  $L$ , в котором находится исследуемый объект, определяются величиной углового поля объектива в пространстве предметов  $2\omega$  с помощью следующей формулы<sup>8</sup>:

$$L = 2l_{\text{набл}} \operatorname{tg}\omega. \quad (23)$$

Определим максимальное значение диафрагменного числа  $K_r$ , которое бы обеспечивало заданные линейные размеры поля наблюдения  $L$ . Для этого совместно решим уравнения (22) и (23) относительно диафрагменного числа  $K_r$ :

$$K_r = \frac{2\Delta p \operatorname{tg}^2 \omega f'^2}{L^2 d_{\text{доп}}}. \quad (24)$$

Так как в экспериментальных исследованиях используется песок средней крупности со средним размером частиц 0,38 мм, то регистрацию

---

<sup>8</sup> Русинов М.М., Грамматин А.П., Иванов П.Д. и др. Вычислительная оптика: Справочник / Под общ. ред. М.М. Русинова. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1984. 423 с., ил.

перемещения частиц грунта под действием внешней силы планируется выполнять с точностью до  $d_t = d_{\text{доп}} = 0,1$  мм. Примем глубину РИП равной диаметру основания конической модели —  $\Delta p = 45$  мм. На основании вышеизложенных положений в качестве объектива предлагается использовать Navitar DO-5095, имеющий следующие основные характеристики:

- фокусное расстояние  $f' = 50$  мм;
- диафрагменное число  $K_r = 0,95 \div 16$ ;
- угловое поле в пространстве предметов  $2\omega(H \times V) = 14^\circ 36' \times 11^\circ 00'$ .

Минимальное значение диафрагменного числа соответствует полностью открытой диафрагме, максимальное значение — полностью закрытой диафрагме. Рассчитаем максимальное расстояние наблюдения для крайних значений диафрагменного числа:

$$l_{\text{набл}}^{\max}(K_r = 0,95) = \sqrt{\frac{\Delta p \cdot f'^2}{2 \cdot d_{\text{доп}} \cdot K_r}} = \sqrt{\frac{45 \cdot 50^2}{2 \cdot 0,1 \cdot 0,95}} \cong 770 \text{ мм} = 0,77 \text{ м}, \quad (25)$$

$$l_{\text{набл}}^{\max}(K_r = 16) = \sqrt{\frac{\Delta p \cdot f'^2}{2 \cdot d_{\text{доп}} \cdot K_r}} = \sqrt{\frac{45 \cdot 50^2}{2 \cdot 0,1 \cdot 16}} \cong 190 \text{ мм} = 0,19 \text{ м}. \quad (26)$$

Определим линейные размеры поля наблюдения в горизонтальной  $H_r$  и вертикальной плоскостях  $V_r$  для крайних значений диафрагменного числа:

- для  $K_r = 0,95$ :

$$H_r = 2l_{\text{набл}} \operatorname{tg}\omega_h = 2 \cdot 0,77 \cdot \operatorname{tg}7^\circ 18' \cong 0,197 \text{ м}, \quad (27)$$

$$V_r = 2l_{\text{набл}} \operatorname{tg}\omega_v = 2 \cdot 0,77 \cdot \operatorname{tg}5^\circ 30' \cong 0,148 \text{ м};$$

- для  $K_r = 16$ :

$$H_r = 2l_{\text{набл}} \operatorname{tg}\omega_h = 2 \cdot 0,19 \cdot \operatorname{tg}7^\circ 18' \cong 0,049 \text{ м}, \quad (28)$$

$$V_r = 2l_{\text{набл}} \operatorname{tg}\omega_v = 2 \cdot 0,19 \cdot \operatorname{tg}5^\circ 30' \cong 0,037 \text{ м}.$$

Определим максимальное значение диафрагменного числа  $K_r$  объекта в планируемых экспериментах. Поскольку высота конической модели больше диаметра ее основания и равна  $B = L = 65$  мм, а угловое поле в пространстве предметов в вертикальной плоскости меньше, чем в горизонтальной, и равно  $2\omega(V) = 11^\circ 00'$ , то максимальное значение диафрагменного числа  $K_r$

$$K_r = \frac{2\Delta p \operatorname{tg}^2 \omega f'^2}{L^2 d_{\text{доп}}} = \frac{2 \cdot 45 \cdot \operatorname{tg}^2 5^\circ 30' \cdot 50^2}{65^2 \cdot 0,1} \cong 4,9. \quad (29)$$

**Расчет освещения объектов съемки.** Для проведения экспериментальных исследований может возникнуть необходимость в дополнительном освещении объектов съемки. Исходные данные для расчета освещения — чувствительность сенсора видеокамеры  $E_c$ , коэффициент отражения снимаемых объектов  $\rho_m$ , коэффициент пропускания объектива  $\tau_0$ , электрическая мощность  $N_u$  и световая отдача источника освещения  $\delta$ .

Для обеспечения нормальных условий работы скоростной видеокамеры необходимо обеспечить освещенность  $E$  ее сенсора не меньше пороговой величины  $E_c$ , указанной в паспорте:

$$E \geq E_c. \quad (30)$$

Освещенность  $E$  сенсора видеокамеры можно определить по формуле<sup>9</sup>:

$$E = \rho_m \tau_0 \frac{J \cos \alpha}{r^2}, \quad (31)$$

где  $J$  — сила света источника, кд;

$\alpha$  — угол, образованный нормалью к плоскости освещения с направлением на источник, град;

$r$  — расстояние от источника до сенсора вдоль оптической оси видеокамеры, м.

Рассчитаем силу света источника  $J$

$$J = \frac{\Phi_i}{4\pi}, \quad (32)$$

где  $\Phi_i$  — световой поток, создаваемый источником освещения, лм.

Таблица 3

**Световая отдача  $\gamma$  различных источников света**

Тип источника	Световая отдача, лм/Вт
Лампа накаливания 100 Вт	13,8
Лампа накаливания 200 Вт	15,2
Галогеновая лампа 100 Вт	16,7
Галогеновая лампа 200 Вт	17,6
Галогеновая лампа 500 Вт	19,8
Кинопроекционные лампы	35
Светодиод	10–200
Ксеноновая дуговая лампа	30–50
Люминесцентная лампа	40–104
Газоразрядная натриевая лампа высокого давления	85–150
Газоразрядная натриевая лампа низкого давления	100–200

Значения светового потока для различных источников приводят в их паспортах. При отсутствии паспортных данных на данный источник его световой поток можно определить по табл. 3, умножая значение световой отдачи на величину электрической мощности  $N_i$  источника излучения<sup>10</sup>:

$$\Phi_i = \gamma N_i. \quad (33)$$

Найдем расстояние  $r$  от источника до сенсора видеокамеры вдоль ее оптической оси

$$r = l_{\text{набл}} + l_{\text{осв}}, \quad (34)$$

где  $l_{\text{осв}}$  — расстояние от источника света до освещаемого объекта, м.

С учетом выражений (32)–(34) уравнение (31) будет иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} E &= \rho_m \tau_0 \frac{J \cos \alpha}{r^2} = \rho_m \tau_0 \frac{\Phi_i \cos \alpha}{4\pi(l_{\text{набл}} + l_{\text{осв}})^2} = \\ &= \rho_m \tau_0 \frac{\gamma N_i \cos \alpha}{4\pi(l_{\text{набл}} + l_{\text{осв}})^2}. \end{aligned} \quad (35)$$

Таким образом, для заданных расстояния наблюдения  $l_{\text{набл}}$  и параметров выбранной скоростной видеокамеры можно рассчитать максимальное расстояние от имеющегося источника света до освещаемого объекта

$$l_{\text{осв}}^{\max} = \sqrt{\rho_m \tau_0 \frac{\gamma N_i \cos \alpha}{4\pi E_c}} - l_{\text{набл}}. \quad (36)$$

<sup>9</sup> Оптика: Учеб. пособие для вузов / Под ред. Н.И. Калитеевского. М.: Высш. шк., 1986. 512 с.

<sup>10</sup> <http://ru.wikipedia.org/>

В качестве объектов съемки предполагается использовать не только модели рабочих органов, изготовленные из стали и имеющие высокий коэффициент отражения, но и движение самих частиц грунта под действием нагрузки, передаваемой данными моделями. Поскольку в планируемых экспериментальных исследованиях предполагается использовать песчаный грунт, то в качестве коэффициента отражения  $\rho_m$  принимаем его значение для песка.

Дисперсность песка оказывает существенное влияние на его коэффициент отражения, который увеличивается от 0,4 до 0,8 с уменьшением размера частиц. Для песка средней крупности принимаем  $\rho_m = 0,4$ . Даные о коэффициентах пропускания  $\tau_0$  конкретных моделей объективов обычно не публикуются. Для практических расчетов в случае стандартного объектива значение коэффициента пропускания<sup>11</sup> примем  $\tau_0 = 0,785$ . В качестве источника света используем лампу накаливания Б220-230-100 ГОСТ Р МЭК 60064-99 мощностью  $N_i = 100$  Вт и световой отдачей  $\gamma = 13,8$  лм / Вт. Для удобства работы и с целью предотвращения прямой засветки видеокамеры отраженным от светопрозрачного экрана светом источник освещения разместим под углом  $45^\circ$  к месту наблюдения ( $\alpha = 45^\circ$ ). Согласно паспортным данным, чувствительность сенсора видеокамеры TMC-6740 GE составит  $E_c = 1,4$  лк. Вычисляем максимальное расстояние от имеющегося источника света до освещаемого объекта при полностью открытой диафрагме объектива

$$\begin{aligned} l_{\text{осв}}^{\max} &= \sqrt{\rho_m \tau_0 \frac{\gamma N_i \cos \alpha}{4\pi E_c}} - l_{\text{набл}} = \\ &= \sqrt{0,4 \cdot 0,785 \cdot \frac{13,8 \cdot 100 \cdot \cos 45^\circ}{4\pi \cdot 1,4}} - 0,77 \cong 3,4 \text{ м.} \end{aligned} \quad (37)$$

Выполненные расчеты легли в основу проектирования элементов конструкции специализированного измерительного комплекса, разрабатываемого для проведения экспериментальных исследований с помощью высокоскоростной видеокамеры с обеспечением установленных требований и условий. Разработанный специализированный измерительный комплекс обеспечивает возможность корректного проведения в полном объеме экспериментальных исследований; достоверность исследования динамического воздействия, связанного с физическим подобием механизмов и явлений ударного процесса погружения моделей в грунт.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Грузин, А.В. Грунтовые среды в условиях статического и динамического нагружения [Текст] : монография / А.В. Грузин, В.В. Грузин, Э.А. Абраменков. — Омск : ОмГТУ, 2009. — 140 с.
- Абраменков, Э.А. Особенности применения специализированного оборудования при проведении лабораторных исследований ударного погружения модели в грунт [Текст] / Э.А. Абраменков, А.В. Грузин, В.В. Грузин // Актуальные проблемы современности. Междунар. науч. журн. — Караганда : Болашак-Баспа, 2008. — № 10 (27). — С. 4–12.
- Абраменков, Э.А. Средства механизации для подготовки оснований и устройства фундаментов [Текст] / Э.А. Абраменков, В.В. Грузин. — Новосибирск : Новосиб. гос. архит.-строит. ун-т, 1999. — 215 с.

<sup>11</sup> [http://sio.su/down\\_asec\\_13\\_def.aspx](http://sio.su/down_asec_13_def.aspx)

4. Г р у з и н, А.В. Скоростная съемка ударного взаимодействия штампа с грунтовой средой и обработка полученных результатов [Текст] / А.В. Грузин, Э.А. Абраменков, В.В. Грузин // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 2. — С. 108–114.
5. Б а т у е в, Г.С. Инженерные методы исследования ударных процессов [Текст] / Г.С. Батуев, Ю.В. Голубков, А.К. Ефремов, А.А. Федосов. — М. : Машиностроение, 1969. — 251 с.

*ГРУЗИН А.В., канд. техн. наук,  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*  
*АБРАМЕНКОВ Э.А., д-р техн. наук, проф.  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено после доработки 20.12.10

**Gruzin A.V.**, candidate of technical sciences, 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

### **SUBSTANTIATION AND CHOICE OF THE EQUIPMENT FOR RESEARCH OF INTERACTION OF THE STAMP WITH GROUND**

In this article maintenance of conditions and their parameters are considered: the frequency of shooting; number of the finished shooting cadres; distance from a videocamera to object and light exposure of objects of shooting depending on technical characteristics of the used equipment; ground kind; weight and size characteristics of the model and speed of shock interaction.

**Key words:** high-speed shooting, videocamera, object of shooting, stand, toolkit of researches, ground, stamp.

#### **REFERENCES**

1. G r u z i n, A.V. Ground environments in conditions of static and dynamic loading [Text] : monograph / A.V. Gruzin, V.V. Gruzin, E.A. Abramenkov. — Omsk : Publishing house OmGTU, 2009. — 140 p.
2. A b r a m e n k o v, E.A. Features of application of the specialized equipment at carrying out of laboratory researches of shock immersing of model in a ground [Text] / E.A. Abramenkov, A.V. Gruzin, V.V. Gruzin // Actual problems of the present. The international scientific magazine. — Karaganda : Bolashak-Baspa, 2008. — N 10 (27). — P. 4–12.
3. A b r a m e n k o v, E.A. Means of mechanization for preparation of the bases and the device of the bases [Text] / E.A. Abramenkov, V.V. Gruzin. — Novosibirsk : NSUACE, 1999. — 215 p.
4. G r u z i n, A.V. High-speed shooting of shock interaction of a stamp with the ground environment and processing of the received results [Text] / A.V. Gruzin, E.A. Abramenkov, V.V. Gruzin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 2. — P. 108–114.
5. B a t u e v, G.S. Engineering methods of research of shock processes [Text] / G.S. Batuev, Yu.V. Golubkov, A.K. Efremov, A.A. Fedosov. — M. : Mechanical engineering, 1969. — 251 p.

УДК 532.532

В.В. ДЕГТЯРЕВ, А.С. ПЛЕТНЕВ, В.В. ЗЫКОВ

## ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОДНЫХ ПОТОКОВ

Описывается аппаратура, с помощью которой регистрируются параметры волны перемещения, и излагается метод калибровки волномеров.

Ключевые слова: эксперимент, волномер, калибровка.

Из-за большой сложности гидрофизических процессов [1, 2], связанных с неустановившимся движением водных потоков, до настоящего времени остались не решенными ряд задач.

На сегодняшний день разработано достаточно математических моделей, описывающих неустановившееся движение водного потока. Их совершенствование, верификация и адаптация к условиям, определяющиеся схематизацией реальной морфометрии русла или сооружения, активно влияющие на поток, требуют предварительного выполнения физического (лабораторного) моделирования, поскольку правильность теории может быть проверена лишь на опыте [3, 4]. Поэтому особенно важным является оправданный выбор регистрирующей параметры волновых процессов аппаратуры и метод калибровки приборов.

Физическое моделирование волн перемещения, возникающих при устранении начального перепада уровней воды, выполнялось в учебно-исследовательской лаборатории кафедры гидротехнических сооружений и гидравлики НГАСУ (Сибстрин) на базе комплексной экспериментальной установки (большой гидравлический лоток) с рабочей длиной 16 м и размерами поперечного сечения 0,38×0,5 м, общий вид которой представлен на рис. 1.

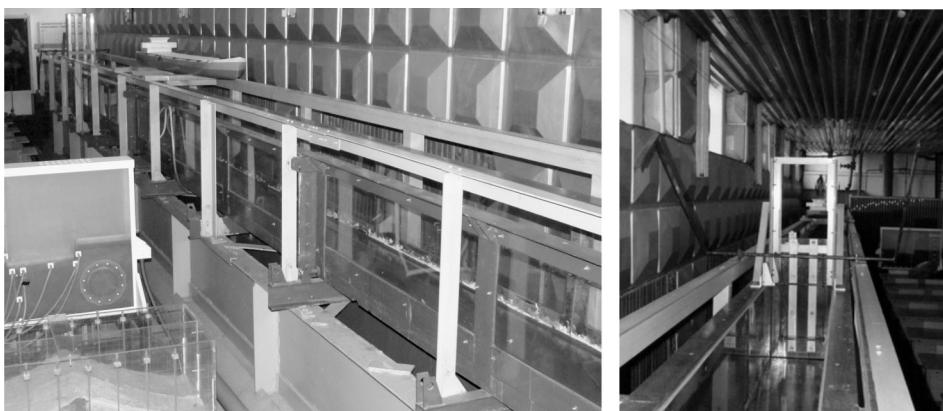


Рис. 1. Экспериментальная установка  
а — большой гидравлический лоток, б — быстрооткрывающийся затвор

Начальный перепад уровня свободной поверхности в опытах создавался применением плоского вертикального затвора, который поднимается за 0,08 с.

Для регистрации параметров волновых процессов используется измерительный комплекс (рис. 2), который включает:

- два четырехканальных измерителя уровня (волномера) с восемью датчиками;
- компьютерную систему с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) для одновременной регистрации выходных сигналов всех датчиков;
- лицензионное программное обеспечение, позволяющее обрабатывать результаты измерений.

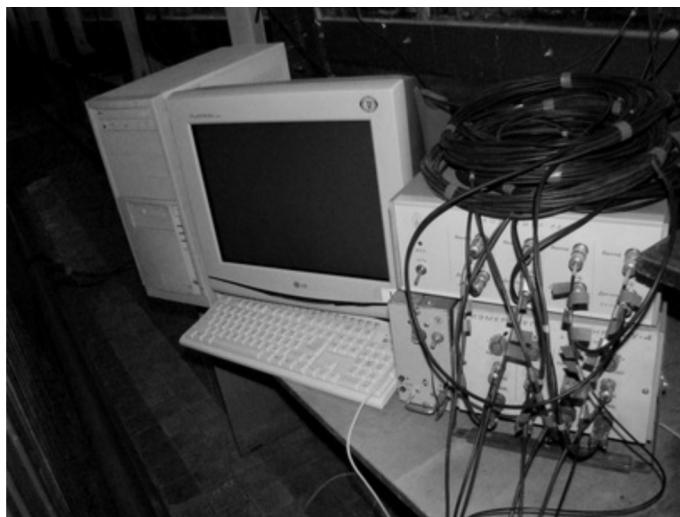


Рис. 2. Измерительный комплекс

Волномерные датчики колебаний уровня свободной поверхности расположены в ряде фиксированных точек в продольной плоскости симметрии лотка.

Датчики и приборы измерительного комплекса разработаны в Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, имеют одинаковый принцип действия и отличаются только некоторыми схемотехническими решениями.

Принцип действия волнометров основан на известном физическом эффекте изменения проводимости (сопротивления) между двумя погружамыми в воду электродами в зависимости от глубины погружения (высоты волны).

Прибор работает на высокой частоте, что устраняет эффект поляризации электродов, и выполняет преобразование: глубина погружения → ток через датчик → выходное напряжение.

Схема одного канала прибора представлена на рис. 3 и включает задающий генератор высокой частоты (~ 25 кГц), усилитель мощности с трансформаторным выходом, усилитель-детектор, выходной сигнал которого подается на вход АЦП.

Выходное напряжение с трансформатора по коаксиальному кабелю поступает на датчик прибора. Зависящий от глубины погружения датчика переменный ток через датчик протекает также через включенный последовательно с датчиком точный измерительный ре-

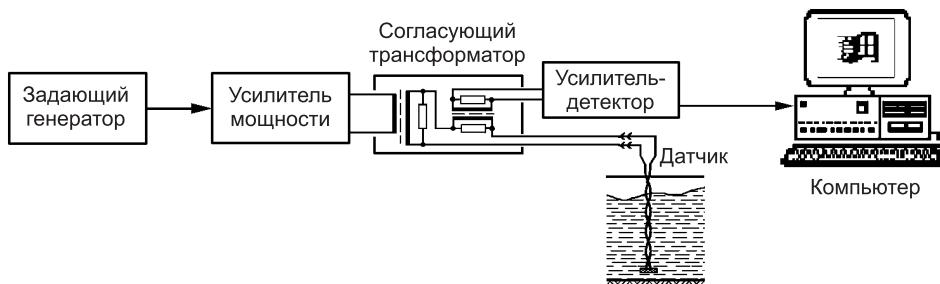


Рис. 3. Схема одного канала прибора

истор. Снимаемое с резистора напряжение через трансформатор подается на двухполупериодный детектор на операционных усилителях, преобразующий амплитуду переменного напряжения в постоянное напряжение положительной полярности. Электрическая постоянная времени схемы детектирования составляет 3,5 мс (0,0035 с). Трансформаторное подключение датчиков к прибору устраниет взаимное влияние каналов и исключает влияние сетевых помех на результаты измерений.

Датчики волномеров — витая пара изолированных проводников диаметром 0,8 мм с зачисткой изоляции по образующей. Нижний торец датчика заформован в пластмассовую пластинку с отверстием под крепление к дну лотка, верхний конец фиксируется винтом в пластмассовом зажиме. Конструкция датчика обеспечивает нечувствительность прибора к расположенным поблизости погруженным моделям и устройствам. Разрешающая способность волномеров ограничивается образованием капиллярных менисков на электродах (рис. 4).

Характеристика преобразования (глубина погружения датчика  $h$  — выходное напряжение  $U$ ) практически линейна, так как определяется линейной зависимостью проводимости пары электродов от глубины их погружения.

Экспериментально полученная характеристика преобразования приведена на рис. 5, а и слабо меняется при изменении проводимости воды в диапазоне, характерном для системы городского водоснабжения.

Компьютерная обработка экспериментальной информации в измерительном комплексе и линейность характеристик преобразования датчиков позволяют заменить достаточно длительную процедуру поточечного измерения коэффициента преобразования на компьютерную калибровку<sup>1</sup>.

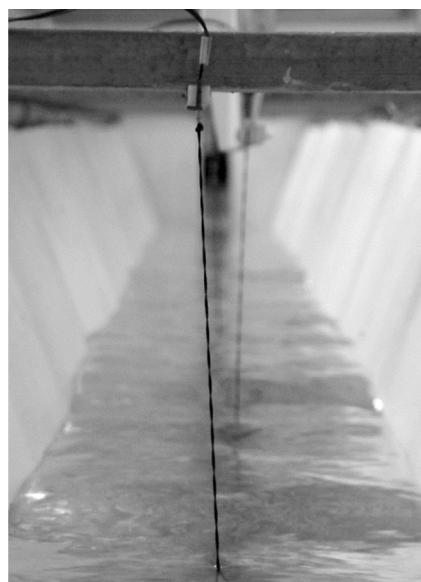


Рис. 4. Волномер

<sup>1</sup> Титце У., Шенк К. Компьютерная калибровка. Полупроводниковая схемотехника. М., 2008. Т.11. С. 469–473.

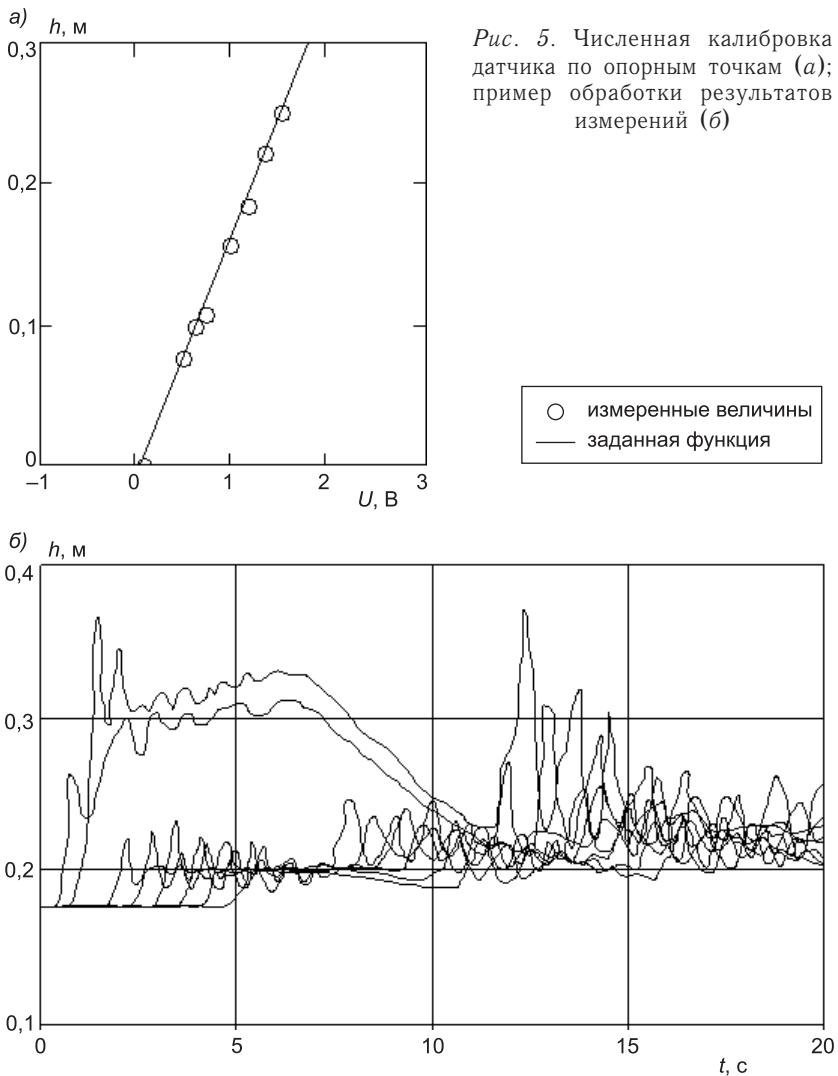


Рис. 5. Численная калибровка датчика по опорным точкам (а); пример обработки результатов измерений (б)

При калибровке предполагается, что величина напряжения  $U$  на входе аналого-цифрового преобразователя является линейной функцией измеряемой величины глубины потока  $h$ :

$$U = a + b \cdot h. \quad (1)$$

Калибровочные коэффициенты  $a$  и  $b$  находятся по двум калибровочным точкам  $(U_1, h_1)$  и  $(U_2, h_2)$  через определяющие уравнения  $U_1 = a + b \cdot h_1$  и  $U_2 = a + b \cdot h_2$ , решаемые относительно  $a$  и  $b$ :

$$b = \frac{U_2 - U_1}{h_2 - h_1}; \quad (2)$$

$$a = U_1 - b \cdot h_1. \quad (3)$$

Для определения физической величины  $h$  по любому экспериментально измеренному значению  $U$  достаточно решить уравнение (1) относительно  $h$ :

$$h = \frac{U - a}{b}. \quad (4)$$

При выполнении процедуры калибровки выбранные калибровочные уровни  $h_1$  и  $h_2$  последовательно устанавливаются на волномерном датчике и их значения вводятся в таблицу в компьютере. В этой же таблице компьютером запоминаются соответствующие отсчеты  $U_1$  и  $U_2$ , измеренные АЦП на выходе волномера.

По данным этой таблицы программа рассчитывает и запоминает калибровочные параметры согласно вышеприведенным уравнениям (2) и (3).

Зарегистрированная в эксперименте величина напряжения  $U(t)$  пересчитывается в физическую величину временного изменения уровня по формуле (4).

Таким образом, при проведении калибровки с помощью компьютера характеристика аппаратуры принимается как нечто заранее заданное и составляется ее уравнение, которое используется для перевода отсчетов  $U$  в физические величины  $h$ . Опорные точки выбираются произвольно, и настройка происходит без итераций, так как калибровочные параметры находят путем решения системы уравнений, что существенно упрощает эту процедуру.

Результаты записи волномеров представляются в виде графиков функции  $h = f(t)$  (см. рис. 5, б).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Атавин, А.А. Оценка возможных последствий аварий на судоходном шлюзе, связанных с разрушением его камер [Текст] / А.А. Атавин, О.Ф. Васильев // Гидравлические и гидродинамические аспекты надежности и безопасности гидротехнических сооружений: тез. докл. междунар. симп. — СПб. : Всерос. науч.-исслед. инт гидротехники, 2002. — С. 121.
2. Гидродинамические аспекты нештатных и аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях [Текст] : монография / А.А. Атавин, В.И. Букреев, О.Ф. Васильев, В.В. Дегтярев, А.П. Яненко; под ред. д-ра техн. наук, проф. В.В. Дегтярева. — Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2009. — 327 с.
3. Букреев, В.И. Гравитационные волны при распаде разрыва над уступом дна открытого канала [Текст] / В.И. Букреев, А.В. Гусев // ПМТФ. — 2003. — Т. 44, № 4. — С. 64–75.
4. Дегтярев, В.В. (мл.). Физическое моделирование нестационарных гидродинамических процессов, возникающих при чрезвычайных аварийных ситуациях на гидротехнических сооружениях [Текст] / В.В. Дегтярев (мл.), В.Н. Шаталина // Тр. НГАСУ. — Новосибирск, 2002. — Т. 5, № 2 (17). — С. 45–52.

ДЕГТЯРЕВ В.В., д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ПЛЕТНЕВ А.С., асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ЗЫКОВ В.В., ст. науч. сотр.

Институт гидродинамики им. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск

Получено 09.03.11

**Degtyaryov V.V.**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

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

**Zycov V.V.**, senior scientist, Lavrentyeva Institute of Hydrodynamics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

# **LABORATORY INSTALLATION AND MEASURING COMPLEX FOR RESEARCH UNSTEADY WATER FLOWS**

The equipment with which help parameter's of a wave of moving are registered is described, and the method of calibration of instruments measurements is stated.

**Key words:** experiment, instruments measurements, calibration.

## **REFERENCES**

1. Atavin, A.A. Estimation of possible consequences of failures on the navigable sluice, its chambers [Text] / A.A. Atavin, O.F. Vasilev // Hydraulic and hydrodynamic aspects of reliability and safety of hydraulic engineering constructions: theses of reports of the international symposium. — SPb.: The All-Russia scientific research institute of hydraulic engineering, 2002. — P. 121.
  2. Hydrodynamic aspects supernumerary and emergencies on hydraulic engineering constructions [Text] : monography / A.A. Atavin, V.I. Bukreev, O.F. Vasilev, V.V. Degtyaryov, A.P. Janenko ; under the editorship of the doctor of technical sciences, professors V.V. Degtyaryov. — Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), 2009. — 327 p.
  3. Bukreev, V.I. Gravitational waves at rupture disintegration over a ledge of a bottom of the open channel [Text] / V.I. Bukreev, A.B. Gusev // PMTF. — 2003. — T. 44, N 4. — P. 64–75.
  4. Degtyaryov, V.V. (ml.). Physical modelling of the non-stationary hydrodynamic processes arising at extreme emergencies on hydraulic engineering constructions [Text] / V.V. Degtyaryov (ml.), V.N. Shatalina // Works NGASU. — Novosibirsk, 2002. — Vol. 5, N 2 (17). — P. 45–52.
-

УДК 539.3:624.04

А.Г. ДЕМЕШКИН, Р.А. РОЛЛОВ, А.А. ШВАБ

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ БАЗАЛЬТОВЫХ НИТЕЙ ПРИМЕНЕНИТЕЛЬНО К ПРОИЗВОДСТВУ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ АРМАТУРЫ\*

Рассматриваются вопросы, связанные с прочностными свойствами базальтовых нитей применительно к производству неметаллической арматуры. Исследуется прочность жгута, состоящего из 4000 нитей (непрерывного базальтового волокна). Предложена методика определения прочностных характеристик жгута из базальтовых нитей.

Ключевые слова: базальт, волокно, нить, жгут, прочность, композит.

В работе исследуются прочностные свойства базальтовой нити как элемента неметаллической арматуры. Интерес к неметаллической арматуре возник по нескольким причинам. Так, при эксплуатации в агрессивных средах бетонных изделий происходит коррозия стальной арматуры, что влечет ограничение сроков эксплуатации изделий. В то же время производство этой арматуры связано с добычей, переработкой руд и металлургическим производством и как следствие высокой себестоимостью арматуры. Поэтому возникла необходимость замены стальной арматуры на неметаллическую с целью обеспечения коррозионных, антимагнитных и диэлектрических свойств сооружений из бетонных конструкций.

Остановимся кратко на некоторых исследованиях и внедрениях неметаллической арматуры [1].

В качестве несущей основы неметаллической арматуры изначально взято непрерывное щелочестойкое стеклянное волокно диаметром 10–15 микрон. Из пучка волокон изготавлялся монолитный стержень посредством синтетических смол (эпоксидной, эпоксифенольной, полиэфирной и др.). Под это разработали непрерывную технологию изготовления арматуры диаметром 6 мм из щелочестойкого стекловолокна малоциркониевого состава Щ-15 ЖТ. Для такой арматуры было проведено исследование химической стойкости, измерены физико-механические характеристики и ее долговечность в бетоне в различных агрессивных средах. Выявлена возможность получения стеклопластиковой арматуры со следующими показателями: временное сопротивление разрыву до 1500 МПа, начальный модуль упругости  $5 \cdot 10^4$  МПа, плотность 1,8–2 т/м<sup>3</sup> при весовом содержании стекловолокна 80 %, рабочая диаграмма при растяжении прямолинейна вплоть до разрыва, предельные деформации к этому моменту достигают 2,5–3 %.

Для стеклопластиковой арматуры проведены исследования по использованию ее в опорах контактной сети и в напорных трубах. Стеклопластиковая арматура нашла также применение в ваннах из полимербетона в цехах электролиза на предприятиях цветной металлургии, в плитах на нескольких складах минеральных удобрений.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке интеграционного проекта СО РАН № 72. По гранту РФФИ № 11-01-00522.

В ряде стран научные исследования в области неметаллической арматуры и использования ее в различных сооружениях в последние десятилетия продвинулись значительно дальше.

В Германии разработана и подробно изучена стеклопластиковая арматура диаметром 7,5 мм из алюмоборосиликатного стекловолокна и полиэфирной смолы под названием «Полисталь». Испытания на статические, динамические и длительные нагрузки позволили установить следующие исходные характеристики этой арматуры: кратковременная прочность на растяжение  $1,65 \cdot 10^3$  МПа, модуль упругости  $5,1 \cdot 10^4$  МПа, удлинение при разрыве 3,3 %. После испытания опытных балок были разработаны основные положения по расчету и конструированию ответственных инженерных сооружений. За последние годы возведено десять одно-, двух- и трехпролетных автодорожных и пешеходных мостов с арматурой «Полисталь». Пролетные строения мостов, достигавшие 25 м, армировались пучками из стеклопластиковых стержней диаметром 7,5 мм с натяжением на бетон. На стержни наносилось защитное полиамидное покрытие толщиной 0,5 мм. Стержней в пучке было 19, рабочее усилие натяжения пучка составляло 600 кН.

Особое внимание разработке проблемы создания и применения высокопрочной неметаллической арматуры уделяется в Японии. Освоено производство фибропластической арматуры на базе углеродных и арамидных волокон, исследованы их физико-механические свойства. Проволока и канаты изготавливаются из углеродного волокна диаметром 7 микрон с пределом прочности  $3,6 \cdot 10^3$  МПа. Проволока собирается из 12 тыс. волокон, соединяемых между собой пластиком. Из проволоки свиваются канаты различной несущей способности, подвергаемые после свивки термической обработке.

Разработан перспективный вид арматуры, в который входят проволока и 7-, 9- и 37-проводочные канаты с разрывным усилием от 10 до 100 кН. Так, например, установлены следующие характеристики 7-проводочных углепластиковых канатов: временное сопротивление  $1,75 \cdot 10^3$  МПа, модуль упругости  $14 \cdot 10^4$  МПа, удлинение при разрыве 1,6 %, плотность  $1,5 \text{ т} / \text{м}^3$ , релаксация напряжений 2,5 %, высокая кислото- и щелочестойкость.

Разработана арматура из арамидных волокон диаметром от 3 до 16 мм с разрывным усилием от 8 до 250 кН. Стержни получают путем сплетения жгутов из непрерывных волокон с последующей пропиткой пластиком и тепловой обработкой. Предельные удлинения арматуры при разрыве равны 2 %, модуль упругости составляет  $6,6 \cdot 10^4$  МПа. Следует отметить, что эта арматура малых диаметров (до 5 мм) пригодна для поперечного спирального армирования конструкций.

В последние десятилетия к исследованиям конструкций с высокопрочной неметаллической арматурой присоединились ученые таких технически развитых стран, как США, Канада, Франция, Англия и др. Большой эксперимент был выполнен учеными США и Канады на одном пролете предварительно напряженного балочного автодорожного моста, армированного проволокой и канатами из углепластика японского производства. Широкое применение современных измерительных систем и продолжение испытания вплоть до разрушения позволили получить обширный комплекс данных, необходимых для положительной оценки мостов с такой арматурой.

В последние годы в России начали больше внимания уделять изучению неметаллической арматуры из базальтового волокна, производство которого менее трудоемко, а сырье вполне доступно [2].

Так, в 2000 г. были разработаны новые технологии и технологическое оборудование для производства непрерывного базальтового волокна (НБВ). Эти разработки дали импульс в развитии промышленного производства базальтовых волокон и позволили существенно расширить потенциальный рынок их применения.

На основе новых технологий в 2000–2002 г. построено предприятие по производству НБВ (г. Пермь), продукция которого используется при производстве материалов из НБВ для автомобильной промышленности.

Применение более совершенных разработок позволило значительно уменьшить расходы энергоносителей и соответственно снизить себестоимость производства НБВ.

Себестоимость производства НБВ стала близкой к себестоимости производства стекловолокна. Запуск установок прошел успешно, было получено НБВ с применением базальтов Китая. Работы проводились в рамках государственной программы Китая № 863 «Базальтовые непрерывные волокна и композиционные материалы на их основе».

Можно констатировать, что в нашей стране разработаны основные исходные данные для промышленного производства стеклопластиковой арматуры диаметром 6–8 мм, проектирования и изготовления различных предварительно напряженных конструкций с такой арматурой, намечены области их целесообразного применения.

Постоянный рост числа различных публикаций о высокопрочной неметаллической арматуре в мировой научно-технической литературе и активная деятельность комиссии ФИБ по этой тематике подтверждают перспективность этого материала для предварительно напряженного железобетона и необходимость более широкой разработки этой проблемы в России.

В данной работе проведены испытания на прочностные свойства непрерывного базальтового волокна производства НПО «Вулкан» (г. Пермь). Необходимо отметить, что физико-механические свойства базальтового волокна связаны с химсоставом базальта и поэтому для каждого базальта проводятся отдельные испытания.

Материал базальтового волокна представлен в виде ровинга в бо-бине. Жгут (плеть) в ровинге состоит из 4000 волокон диаметром по 15 мкм. В дальнейшем вместо слова волокно будем употреблять слово нить, имея в виду непрерывное базальтовое волокно.

По химическому составу материал в процентном содержании имеет следующие характеристики:  $\text{SiO}_2 = 52,8$ ,  $\text{TiO}_2 = 0,5$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 17,2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 8,9$ ,  $\text{MgO} = 6,3$ ,  $\text{CaO} = 7,1$ ,  $\text{Na}_2\text{O} = 2,2$ ,  $\text{K}_2\text{O} = 1,6$ .

Поскольку испытательная машина не позволяла проводить эксперименты на нескольких нитях по отдельности, то исследование прочностных свойств нитей было разбито на два этапа. На первом этапе проводились статические испытания на прочность. Так, к нескольким нитям подвешивались грузы с последующим догружением, а затем фиксировался момент разрыва, т.е. нагрузка разрыва. В табл. 1 приведены результаты испытаний разрыва нескольких нитей. Нити на концах зажимались картонными склейками. Точность дагрузки — до  $0,1 \cdot 10^{-3}$  Н.

При данных испытаниях вычисленная средняя прочность нити составила  $0,088$  Н. После этой серии испытаний проводились испытания с минимальным количеством нитей. Установлено, что чем меньше количество нитей, тем выше вычисленная прочность одной нити. Это объясняется эффектом разной нагруженности нитей в процессе деформирования. Средняя прочность нити около  $14,6 \cdot 10^{-2}$  Н (табл. 2).

Таблица 1

Номер образца	Нагрузка, Н	Количество нитей	Нагрузка на нить, Н
1	16,52	213	0,078
2	1,640	198	0,082
3	1,710	215	0,079
4	0,890	93	0,095
5	0,822	94	0,087
6	0,667	69	0,096
7	0,635	67	0,095
8	0,558	60	0,093
9	0,490	48	0,102
10	0,178	22	0,081

Таблица 2

Номер образца	Нагрузка, $10^{-2}$ Н	Количество нитей	Нагрузка на нить, $10^{-2}$ Н
1	57	4	14,3
2	90	7	12,8
3	183	13	14
4	133	10	13,3
5	165	13	12,7
6	129	9	14,3
7	210	13	16,1
8	116	7	16,5
9	66	4	16,5

По результатам опытов видно, что при испытании более 200 нитей наблюдается большой разброс показаний. На втором этапе была поставлена задача на испытание прочности всего жгута. Для этого использовали разрывную машину фирмы Zwik/Roell 8506. Рабочая длина образца 100 мм. На торцах жгут зажимался картонными склейками. Постоянная скорость нагружения составляла  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

При первых испытаниях образцов получен значительный разброс в данных, так как при изготовлении образцов, содержащих 4000 нитей, не удавалось получить одинаковые рабочие длины в образце для всех нитей. Это связано с тем, что нити имеют небольшие остаточные напряжения, появившиеся в процессе охлаждения после печи, и в спокойном состоянии нити имели волнообразный вид и, следовательно, различные длины в образцах из жгута (плети). Поэтому в процессе деформирования первоначально рвались короткие нити, а затем остальные. На графиках рис. 1 (нагрузка — удлинение) появляется ниспадающая ветвь, которая характерна только для пластических материалов и не характерна для базальта [2]. На рис. 1 этому соответствуют испытания образцов № 6, 4, 5.

С целью релаксации остаточных напряжений и выравнивания распределения усилий в нитях было предложено перед испытанием нагружать жгут и выдержать его при нагрузке несколько дней. После 10 сут выдержки при нагрузке 100 Н жгут не изменил своих характеристик.

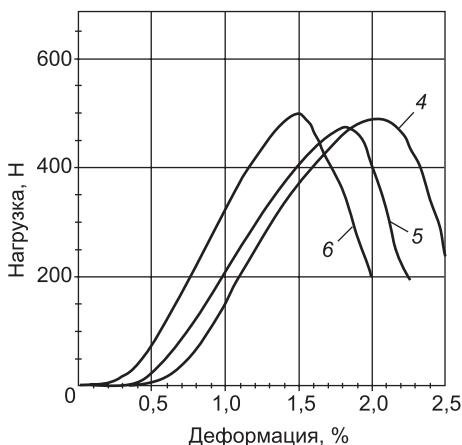


Рис. 1

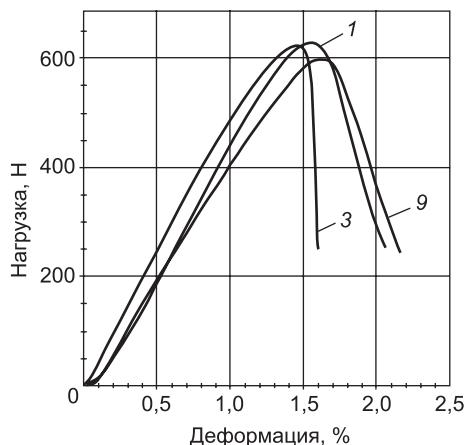


Рис. 2

Как отмечалось ранее, каждая нить в отдельности имеет незначительные остаточные напряжения, которые влияют на ее отклонение от прямой линии в свободном состоянии. Поскольку диаметр нити весьма мал, то было предложено при изготовлении образца смачивать нити слабым вяжущим раствором на основе воды.

Так, нити смачивались, затем разглаживались (растягивались), а после этого зажимались на концах. Полученные образцы испытывались на разрыв.

Результаты испытаний показали достаточно хорошую повторяемость эксперимента. На этих образцах при разрыве диаграмма имела более круглую ниспадающую ветвь. Пересчет разрывной нагрузки на одну нить давал около 0,15 Н, что близко к значениям испытаний, приведенным в табл. 2. На графиках рис. 2 это соответствует номерам испытаний образцов 1, 3, 9. Прочность данных базальтового жгута составила 860 МПа. Модуль Юнга  $5,7 \cdot 10^4$  МПа, деформации составляли около 1,5 %. Можно отметить, что модуль Юнга в среднем на 20 % выше при испытаниях 1, 3, 9, чем при испытаниях 4, 5, 6.

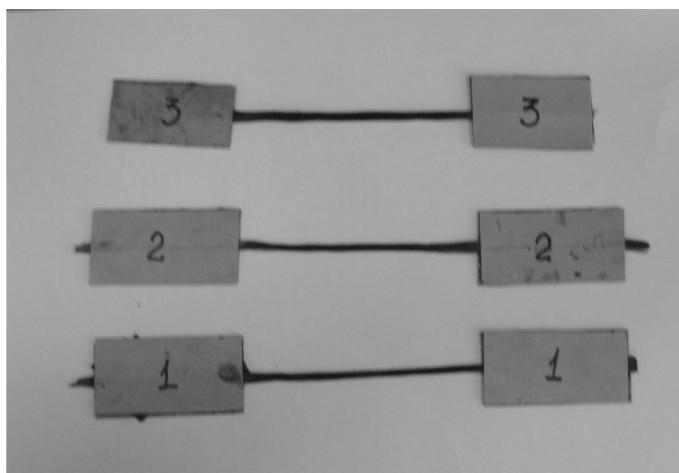


Рис. 3



Рис. 4

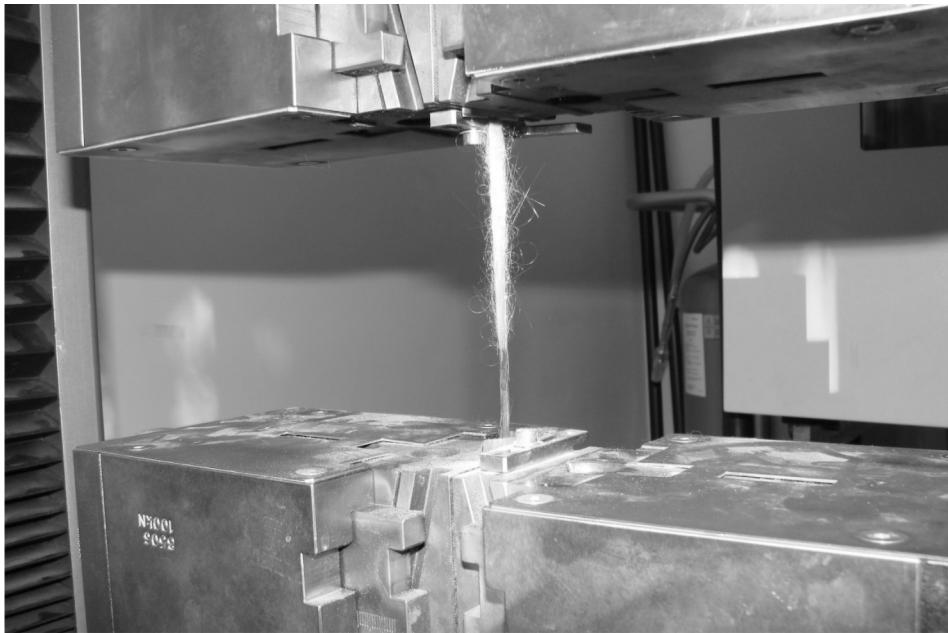


Рис. 5

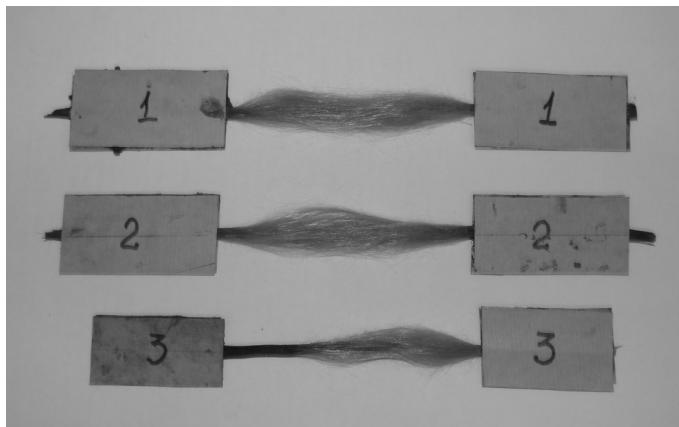


Рис. 6

На рис. 3–6 показаны образцы до испытаний, во время и после испытаний. Так, на рис. 3 показаны образцы (обработанные раствором) до испытаний. На рис. 4 приведено фото разрушения образца № 1. На рис. 5 показано разрушение образца № 3, начавшееся с верхней части образца. На рис. 6 приведены образцы 1, 2, 3 после разрушения.

Следует отметить, что существующие эксперименты по определению прочности базальтовой фибры (короткого базальтового волокна длиной 20 мм) требуют уникальных испытательных установок [2]. С другой стороны, в конструкциях используется жгут и его прочностные характеристики будут несколько отличные от фибры. Поэтому при расчете конструкций предпочтительно использовать данные о механических свойствах жгута. Также можно отметить, что «конструкционная» прочность жгута несколько ниже прочности фибры.

**Выводы.** Проведены эксперименты по исследованию прочностных и деформационных свойств нитей из непрерывного базальтового волокна и жгута, состоящего из 4000 волокон. Показано влияние остаточных на-

пряжений на результаты эксперимента по определению прочности волокна и модуля Юнга.

Подобная методика позволяет проводить испытания различных жгутов из базальтового непрерывного волокна.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлов, К.В. Перспективы применения неметаллической арматуры в преднатяженных бетонных конструкциях [Текст] / К.В. Михайлов // Бетон и железобетон. — 2003. — № 5. — С. 29–30.
2. Аблесимов, Н.Е. Релаксационные эффекты в неравновесных конденсированных средах. Базальты: от извержения до волокон [Текст] / Н.Е. Аблесимов, А.Н. Земцов. — М. : ИТИГ ДВО РАН, 2010. — 400 с.
3. Sim, J. Characteristics of basalt fiber as strengthening material for concrete structures [Текст] / J. Sim, Cheolwoo Park, Do Young Moon // Composites. — Part B 36 (2005). — P. 504–512.

ДЕМЕШКИН А.Г., канд. физ.-мат. наук

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск

РОЛЛОВ Р.А., ген. директор Ltd. «TOPLOOR-INVEST», Франкфурт, Германия

ШВАБ А.А., д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: Schwab@ngs.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 02.03.11

**Demeshkin A.G.**, candidate of physical and mathematical sciences, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

**Rollov R.A.**, director Ltd. «TOPLOOR-INVEST», Frankfurt, Germany

**Schwab A.A.**, doctor of physical and mathematical sciences, professor; E-mail: Schwab@ngs.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## RESEARCH MECHANICAL PROPERTIES OF BASALT THREADS WITH REFERENCE TO MANUFACTURE NONMETALLIC ARMATURE

In work it is considered questions connected with mechanical properties of basalt threads with reference to manufacture of nonmetallic armature. Durability of the plait consisting of 4000 threads (a continuous basalt fibre) is investigated. The definition technique mechanical characteristics of a plait from basalt threads is offered.

**Key words:** basalt, fibre, thread, plait, durability, composite.

## REFERENCES

1. Mihailov, K.V. Prospect of application of nonmetallic armature in preintense concrete designs [Text] / K.V. Mihailov // Concrete and ferro-concrete. — 2003. — N 5. — C. 29–30.
2. Ablèsimov, N.E. Relaxations effects in the nonequilibrium condensed environments. Basalts: from eruption to fibres [Text] / N.E. Ablèsimov, A.N. Zemtsov. — M. : ITIG DVO the Russian Academy of Sciences, 2010. — 400 c.
3. Sim, J. Characteristics of basalt fiber as strengthening material for concrete structures [Text] / J. Sim, Cheolwoo Park, Do Young Moon // Composites. — Part B 36 (2005). — P. 504–512.

УДК 624.131

А.П. КРИВОРОТОВ, А.В. ЛУБЯГИН, В.А. БАБЕЛЛО, Д.В. ГРИШИН

## К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СЛОЖНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ МОДЕЛЕЙ ГРУНТА

Получены новые данные о степени изменения параметров связи «напряжение — деформации» для образцов песчаного грунта при простом их нагружении, отличающемся от стандартного стабилометрического. Полученные результаты свидетельствуют о некорректности применения стандартных уравнений связи в геотехнических расчетах оснований и массивов, находящихся в условиях сложного напряженного состояния.

**Ключевые слова:** песчаный грунт, условия нагружения, параметры пластичности, некорректность расчетов.

В критической статье А.Г. Шашкина [1] справедливо отмечается «перегруженность большинства... (нелинейных моделей. — **А.К.**) математическими зависимостями, не имеющими под собой физических оснований. При практическом применении сложность моделей играет скорее негативную роль, не всегда позволяя исследователю четко представить себе особенности их работы при различных напряженных состояниях». Этот вывод объективно отражает состояние вопроса о возможности практического применения сложных нелинейных моделей грунта в расчетной практике.

В расчетах по определению напряженно-деформированного состояния (н.д.с.) грунтового основания часто используются физические зависимости «напряжение — деформации», установленные в простейшем случае, чаще всего в условиях осесимметричного напряженного состояния (н.с.) среди — при испытании грунтов в стабилометрах (ГОСТ 12248–96). В реальных условиях характер н.с. в различных точках грунтового основания не является осесимметричным. Нами, к примеру, установлена существенная разница поведения образцов песчаного грунта (плотного и рыхлого) в условиях осесимметричного н.с. и в условиях плоской деформации [2]. Это обстоятельство при упомянутом подходе не может не отразиться на результатах прогнозирования смещений фундаментов.

С целью выяснения величины возможных ошибок установлены параметры физических зависимостей, рекомендуемых в программном комплексе (п.к.) Plaxis [3], для случаев осесимметричного и общего вида н.с. плотных и рыхлых песчаных образцов. Опыты по определению н.д.с. образцов проведены с использованием прибора трехосного сжатия, где на грани кубического образца размерами 0,14 м передавались нормальные давления, а деформации образца по направлению действия этих давлений оценивались по объему жидкости, подаваемой в камеры прибора [2]. Осесимметричное н.с. образца создавалось равенством боковых давлений, плоская деформация — обеспечением неподвижности одной пары боковых граней образца. Коэффициент пористости плотного песка  $e = 0,49$ , рыхлого — 0,56.

Главные напряжения  $\sigma_1 = \sigma_z$  в образце грунта возрастили ступенями через 0,05 МПа до наибольшего значения, равного 0,6 МПа при соотно-

шениях  $\xi = \sigma_y/\sigma_z = 1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,3$  (рыхлый песок) и далее —  $0,2; 0,1$  (плотный песок). В процессе увеличения вертикальных давлений соотношение напряжений  $\xi$  оставалось неизменным, что соответствует условиям простого нагружения образца. Следует заметить, однако, что при этом в условиях плоской деформации происходит изменение параметра Лоде  $\mu_\sigma$  в диапазоне от  $(+1)$  до  $(-1)$ , что уже предопределяет различный характер нарастания деформаций образцов по сравнению с условиями осесимметричного н.с., именуемого «стандартными» [1].

Другая особенность упомянутых экспериментов — иная траектория возрастания напряжений, отличающаяся от «стандартной», где предполагается справедливость использования принципа суперпозиции (принципа «двойного упрочнения» [1]). Использованная нами методика проведения испытаний позволяет сразу установить величину относительных деформаций, вызванных воздействием и шарового тензора, и девиатора напряжений. При такой методике испытаний грунта его начальные показатели деформируемости (модуль деформации и коэффициент Пуассона) устанавливаются с учетом природного давления в рассматриваемой точке основания, а текущий модуль деформации — как функция полного напряженного состояния (природного плюс наложенного дополнительного). В этом случае осадки фундаментов можно рассчитывать скорректированным методом послойного суммирования деформаций [4].

Увеличение относительных вертикальных деформаций  $\varepsilon_1$  в условиях осесимметричного н.с. испытанных образцов грунта представлено графиками рис. 1. Связь девиатора напряжений  $q_f = \sigma_1 - \sigma_3$  с деформациями  $\varepsilon_1$  в данном случае выражается зависимостью [3]:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{\sigma_1}{p_{ref}} \right)^m \dots, \quad (1)$$

где  $p_{ref} = 0,125$  МПа,  $E_{50}^{ref} = 56$  МПа,  $m = 0,58$  (плотный песок);

$p_{ref} = 0,125$  МПа,  $E_{50}^{ref} = 7,6$  МПа,  $m = 0,54$  (рыхлый песок).

Здесь  $p_{ref}$  — контрольное всестороннее давление,  $E_{50}^{ref}$  — контрольный модуль жесткости [3],  $m$  — показатель степени текучести грунта.

В общем случае н.с. грунта параметры уравнения (1) будут иными, поэтому использование зависимости (1) в расчетах н.д.с. оснований, а также в расчетах осадок фундаментов приводит к получению ошибочных результатов.

Полученные опытные данные по деформируемости песчаного грунта в условиях плоской деформации показаны на рис. 2. Обработка результатов производилась без учета влияния среднего главного напряжения  $\sigma_2$ ; траектории возрастания напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  были такими же, как в опытах с осесимметричным н.с. образцов грунта. Для образцов плотного песка получены следующие значения параметров зависимости (1):  $p_{ref} = 0,125$  МПа,  $E_{50}^{ref} = 95$  МПа,  $m_n = 0,64$ . Для образцов рыхлого песка установлены значения  $p_{ref} = 0,125$  МПа,  $E_{50n}^{ref} = 10$  МПа,  $m_n = 0,59$ .

Во всех случаях значения показателя  $m$  в формуле (1) вычислены путем осреднения трех его значений, вычисленных по формуле (1) с использованием экспериментальных данных, изображенных на рис. 1 и 2 при четырех отраженных рисунками значениях  $\sigma_1$ . Разброс значений показателя  $m$  во всех случаях не был чрезмерно большим. Так, для условий

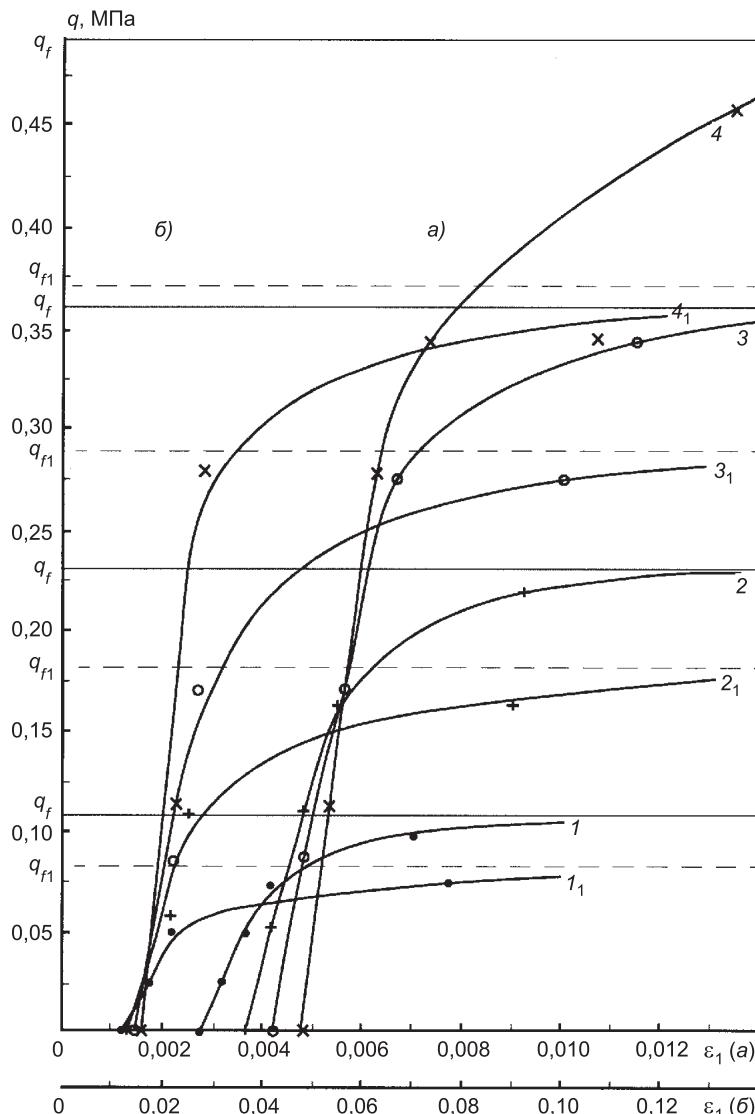


Рис. 1. Графики (1–4) увеличения деформаций  $\varepsilon_1$  образцов плотного (а) и рыхлого (б) песка при максимальных значениях сжимающих напряжений  $\sigma_1 = 0,125; 0,275; 0,42$  и  $0,575$  МПа соответственно; осесимметричное напряженное состояние образцов;  $q_f$  ( $q_{f1}$ ) — предельные девиаторные напряжения

осесимметричного н.с.  $m_i = 0,55; 0,64$  и  $0,58$  (плотный песок) и  $m_i = 0,49; 0,60$  и  $0,53$  (рыхлый песок);  $i = 1, 2, 3$ .

В условиях плоской деформации получены значения параметров  $m_i = 0,62; 0,7$  и  $0,59$  (плотный песок) и  $m_i = 0,52; 0,61$  и  $0,63$  (рыхлый песок).

Сопоставление значений  $E_{50}^{ref} = 56$  и  $95$  МПа, а также  $m = 0,58$  и  $0,64$  (в условиях осесимметричного н.с. и плоской деформации плотного песка соответственно) позволяет сделать вполне определенный вывод о том, что деформационные характеристики грунта  $E_{50}$  в условиях плоской деформации при прочих равных условиях всегда будут больше принятых по данным испытаний грунта в стабилометре, т.е. в условиях, рекомендуемых методикой [3] и ГОСТ 12248–96. Как видно, в данном случае расчет

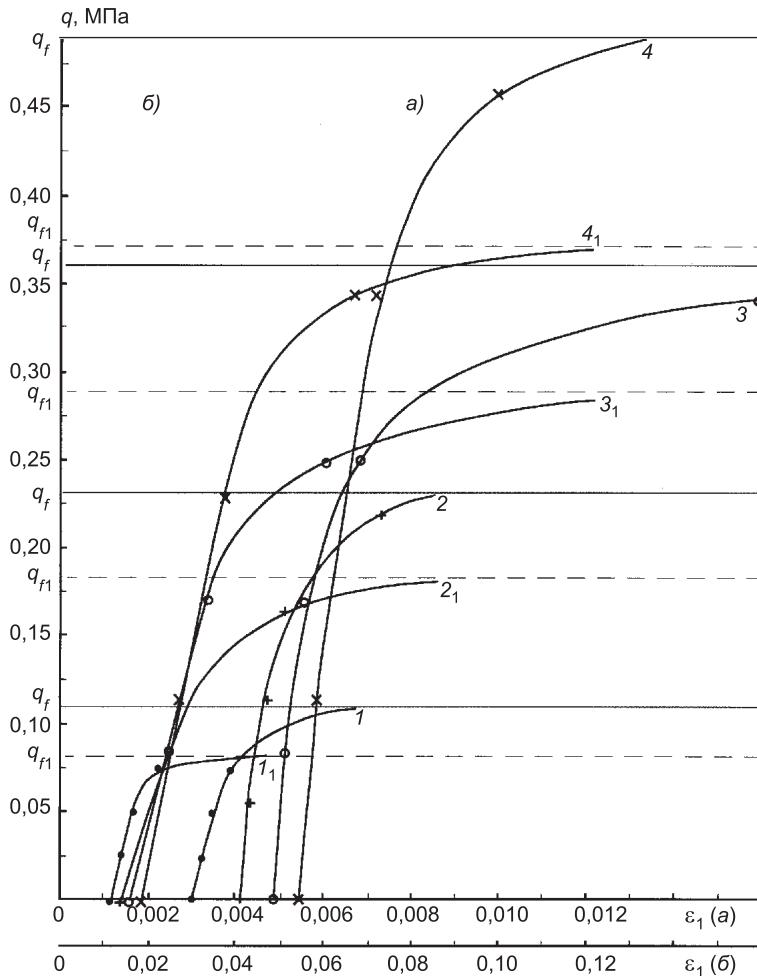


Рис. 2. Графики (1–4) увеличения деформаций  $\varepsilon_1$  образцов плотного (а) и рыхлого (б) песка при максимальных значениях сжимающих напряжений  $\sigma_1 = 0,125; 0,275; 0,42$  и  $0,575$  МПа соответственно; условия плоской деформации образцов;  $q_f(q_{f1})$  — предельные девиаторные напряжения

ты грунтовых оснований ленточных фундаментов по методике [3] при прочих равных условиях приводят к преувеличению ожидаемых осадок ориентировочно на величину  $\kappa > E_{50,n}^{ref}/E_{50}^{ref} = 95/56 = 1,7$ .

В рыхлом песке соответствующие значения  $E_{50}^{ref}$  и  $E_{50,n}^{ref}$  равны 7,6 и 10 МПа, а значения показателей  $m$  — 0,54 и 0,59. Их сопоставление в данном случае позволяет установить значение  $\kappa > 10/7,6 = 1,3$ .

Деформации песчаных образцов в случае их «расплющивания» (т.е. деформаций растяжения в направлении действия среднего напряжения  $\sigma_2 > \sigma_3$ ) представлены на рис. 3. Следует отметить, что это наиболее вероятный случай общего вида н.с. грунтовой среды при первичном ее загружении. Напряжения  $\sigma_2 \geq \sigma_3$  всегда реактивные, т.е. они возникают только при «расплющивании» элементарных объемов грунта под действием активных напряжений  $\sigma_1$ .

Напряженное состояние образцов плотного грунта в названном случае создавалось путем сохранения в каждом из опытов постоянного отношения  $\xi = \sigma_3/\sigma_1 = 0,2 = \text{const}$  и значений  $\xi_1 = \sigma_2/\sigma_1 = 1; 0,8; 0,6$ ;

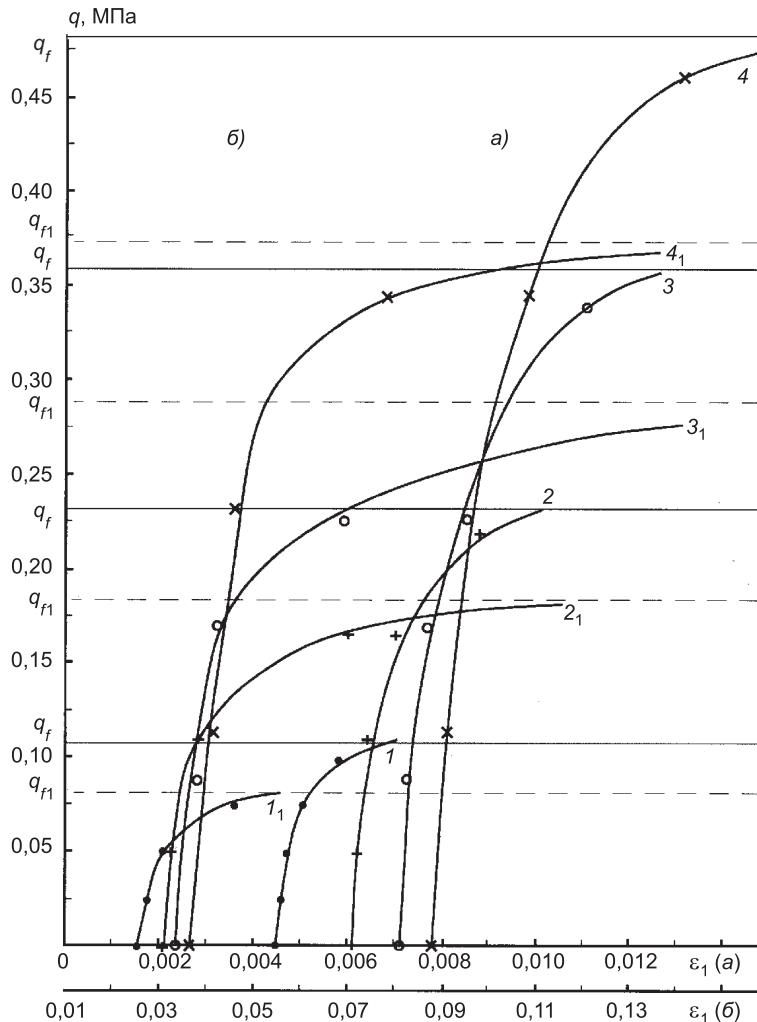


Рис. 3. Графики (1–4) увеличения деформаций  $\varepsilon_1$  образцов плотного (а) и рыхлого (б) песка при максимальных значениях сжимающих напряжений  $\sigma_1 = 0,125; 0,275; 0,42$  и  $0,575$  МПа соответственно; сложное предельное напряженное состояние образцов;  $q_f(q_f)$  — предельные девиаторные напряжения

0,4; 0,2. Предельное по прочности плотного песка значение  $\xi_n = 0,15$  ( $\phi = 44^\circ 22'$ ). При контролльном давлении  $p_{ref} = 0,125$  МПа контрольный параметр  $E_{50}^{ref} = 165$  МПа. Значение коэффициента  $m$  установить не удалось, так как при  $\sigma_1 > p_{ref}$  значения  $E_{50}$  уменьшались. Таким образом, для этого случая получена качественно иная по сравнению с уравнением (1) зависимость, связывающая показатель жесткости  $E_{50}$  с соотношением напряжений  $\sigma_1/p_{ref}$ . Это явление связано, очевидно, с активным проявлением дилатансионных процессов в плотном грунте, с большими деформациями сдвига в предпредельном состоянии материала; в зависимости (1) дилатансия грунта не учитывается.

Предпредельное н.с. рыхлого песка получено при значении  $\xi = 0,4$  и отношениях  $\xi_1 = \sigma_2/\sigma_1 = 1; 0,8; 0,6$  и  $0,4$ . Предельное значение  $\xi_n = \sigma_3/\sigma_1 \approx 0,3$  ( $\phi = 32^\circ$ ). По результатам испытаний образцов в этой

серии при  $p_{ref} = 0,125$  МПа получены значения  $E_{50}^{ref} = 3,7$  МПа и  $m = 0,46$  ( $m_i = 0,38; 0,54$  и  $0,46$ ).

Таким образом, в общем случае н.с., близком к предельному по прочности, показатели жесткости  $E_{50}$  плотного песка явно несопоставимы с таковыми для условий осесимметричного н.с., а показатели жесткости рыхлого песка ( $E_{50}^{ref} = 3,7$  МПа,  $m = 0,46$ ) существенно отличаются от аналогичных показателей, оценивающих осесимметричные н.с. ( $E_{50}^{ref} = 7,6$  МПа,  $m = 0,59$ ).

Итак, исследованные три разновидности н.с. плотного песка оцениваются показателями  $E_{50}^{ref} = 56; 95$  и  $165$  МПа, а рыхлого —  $E_{50}^{ref} = 7,6$ ;  $10$  и  $3,7$  МПа при значениях  $p_{ref} = 0,125$  МПа.

Одометрическое сжатие исследованного плотного песка при  $p_{ref} = \sigma_1 = 0,125$  МПа оценивается показателем  $E_{oed}^{ref} = 78$  МПа, а рыхлого —  $E_{oed}^{ref} = 26,5$  МПа. При любом ином значении  $\sigma_1 \neq p_{ref}$  одометрический показатель  $E_{oed}$ , ответственный за пластические объемные деформации, в данном случае при сцеплении  $c = 0$ , определяется зависимостью [3]:

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left( \frac{\sigma_1}{p_{ref}} \right)^m,$$

где в случае плотного песка  $m = 0,58$ , а в случае рыхлого  $m = 0,54$ .

При стандартной траектории [3] нагружения образцов грунта, отличающейся от принятой в обсуждаемых опытах, параметры зависимости (1) могут быть иными, в то время как общие закономерности, описанные выше, могут сохраняться.

**Выводы.** Модули жесткости  $E_{50}$  нелинейно-деформируемой упрочняющейся среды (оснований, массивов) в различных ее точках, находящихся в сложном напряженном состоянии, существенно отличаются от аналогичных показателей, установленных в условиях осесимметричного напряженного состояния (в стабилометрах). Это обстоятельство делает проблематичным возможность применения зависимостей, используемых в модели упрочняющейся среды для расчета н.д.с. реальных оснований и массивов. В рассматриваемом случае коэффициенты ( $\kappa$ ) надежности расчетов, установленных при сложном н.с. образца, отличаются от подобных коэффициентов, установленных в осесимметричном н.с., в  $1,7 \div 1,3$  раза, так что вид н.с. заметно сказывается на величине параметров физического уравнения, используемого в модели упрочняющейся среды.

Параметры модели упрочняющейся среды, устанавливаемые в стабилометре, могут существенно различаться при разных траекториях возрастания главных напряжений (при стандартном, простом или других вариациях сложного нагружения). Эти обстоятельства служат достаточным основанием для применения более простых моделей нелинейно-деформируемой среды типа моделей Мора — Кулона.

В случае сильно дилатирующих плотных песков, по крайней мере, в каком-то диапазоне изменения девиатора, необходимо выявить и использовать в расчетах иную зависимость.

Отмеченные специфические особенности грунтов, влияющие на параметры физических зависимостей, принятых в нелинейных моделях (в дополнение к природной неоднородности и анизотропии грунтов), представляют достаточно оснований для согласия с положением, изложенным в начале статьи.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шашкин, А.Г. Критический анализ наиболее распространенных нелинейных моделей работы грунта [Текст] / А.Г. Шашкин // Инженерная геология. — 2010. — № 3. — С. 29–37.
2. Криворотов, А.П. Деформируемость песка в условиях осесимметричного напряженного состояния и плоской деформации [Текст] / А.П. Криворотов, В.Д. Кемеров // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1987. — № 8. — С. 127–131.
3. Plaxis. Finite Element Code for Soil and Rock Analyses. / Руководство пользователя: Версия 8. — Нидерланды: Дельфтский технологический университет, 2002.
4. Криворотов, А.П. О совершенствовании метода послойного суммирования деформаций в расчете осадок фундаментов [Текст] / А.П. Криворотов // Изв. вузов. Строительство. — 1995. — № 2. — С. 40–47.

*КРИВОРОТОВ А.П., д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*ЛУБЯГИН А.В., инж.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*БАБЕЛЛО В.А., канд. техн. наук, доц.*

*Читинский государственный политехнический университет*

*ГРИШИН Д.В., инж.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено после доработки 01.03.11

**Krivorotov A.P.**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

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

**Babello V.A.**, candidate of technical sciences, assistant professor, Chita State Technical University, Russia

**Grishin D.V.**, engineer, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## TOWARDS THE PROBLEM ON USE OF DIFFICULT NONLINEAR MODELS OF A SOIL

The new data on the degree of the change in «stress - strain» relationship parameters are obtained for the samples of the sandy soil under simple loading, different from the standard stabilometric loading. The results witness the incorrectness of the application of the standard relationship equations in the geotechnical calculations of the bases and soil grounds under the complex stressed conditions.

**Key words:** sandy soil, loading conditions, the parameters of plasticity, incorrect calculation.

## REFERENCES

1. Shashkin, A.G. Critical analysis of the most common non-linear models of soil [Text] / A.G. Shashkin // Engineering geology. — 2010. — N 3. — P. 29–37.
2. Krivorotov, A.P. Deformability of the sand under axisymmetric stress state and plane strain [Text] / A.P. Krivorotov, V.D. Kemerov // News of Higher Educational Instructions. Construction and Architecture. — 1987. — N 8. — P. 127–131.
3. Plaxis. Finite Element Code for Soil and Rock Analyses. / Instruction Manual: Version 8. — Netherlands : Delft Technological University, 2002.
4. Krivorotov, A.P. On improving the method of layer wise summation of deformations in the calculation of sediment foundations [Text] / A.P. Krivorotov // News of Higher Educational Instructions. Construction. — 1995. — N 2. — P. 40–47.

УДК 678.026.38:536.21

**В.Г. МАКАРОВ, Р.М. СИНЕЛЬНИКОВА, Д.В. КОСИЛОВА,  
А.Г. КУЧЕРЕНКО**

## **РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ФУТЕРОВКАХ**

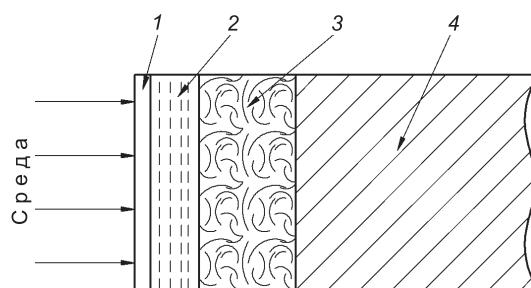
Рассмотрено проявление температурных напряжений в стеклопластиковых футеровках при резком изменении температуры среды — тепловом ударе. Получено уравнение для расчета времени существования температурного перепада между функциональными слоями стеклопластика.

**Ключевые слова:** стеклопластиковая футеровка, нестационарная теплопроводность, температурные напряжения.

При эксплуатации резервуаров, бассейнов, трубных систем, кислотных ванн, хранилищ промышленных стоков и т.п. строительных сооружений и изделий на основе металла, бетона или стеклопластика для предотвращения электрохимической коррозии или химической деструкции конструкционного материала широко применяются стеклопластиковые покрытия (футеровки) на основе химически стойких фурановых, эпоксидных, полиэфирных, эпоксивинилэфирных и других смол.

Типичная структура и состав стеклопластиковой футеровки (рис. 1) включает слой монолитной смолы толщиной 0,08–0,5 мм (гелькоут), слабоармированный слой толщиной до 0,16–0,9 мм на основе синтетической или стеклянной вуали с содержанием наполнителя до 7–10 % и последующий ламинат толщиной 2,1–2,5 мм из 2–4 слоев стекломата, пропитанных химически стойкой смолой и содержащий 26–29 % наполнителя [1].

Химически стойкие смолы ПН-15, Дион 9100, Хетрон 678 и др. гарантируют безотказную эксплуатацию защищенных сооружений в течение длительного срока службы, составляющего несколько десятилетий [2]. Однако практика эксплуатации футерованных изделий и конструкций, особенно в условиях знакопеременных температур, показывает, что при экстремальном режиме работы, например, стеклопластиковых труб при тепловом ударе, возникающем при пуске или остановке технологического процесса, может происходить внезапное растрескивание футеровки из-за температурных напряжений. Трецинообразование в стеклопластиковой футеровке обусловлено различными теплофизическими свойствами синтетической смолы, стеклонаполните-



*Rис. 1. Типичная структура строительной конструкции с футеровочным слоем*

*1 — гелькоут; 2 — первый химически стойкий слой на основе стекловуали; 3 — второй химически стойкий слой на основе стекломатов; 4 — конструкционный материал*

ля, а также изолируемого конструкционного материала. Эти различия проявляются в момент резкого изменения температуры рабочей среды и возникновения теплового потока от горячей поверхности футеровки, контактирующей с рабочей средой к холодной поверхности конструкционного слоя.

Настоящая статья посвящена оценке временной базы температурных напряжений, появляющихся в различных слоях строительной конструкции или многослойного изделия в условиях нестационарной теплопроводности.

Футерованная строительная конструкция или изделие представляет с точки зрения теплопередачи многослойную, анизотропную по теплофизическими свойствам структуру. Гелькоут ( $\Gamma$ ), первый (1ХСС) и второй (2ХСС) химически стойкие слои стеклопластиковой футеровки существенно отличаются по физическим свойствам и, в первую очередь, по теплофизическими от свойств конструкционного материала (см. таблицу).

#### **Теплофизические свойства слоев и компонентов строительной конструкции**

Наименование	Плотность, кг / м <sup>3</sup>	Теплоемкость кДж / кг·К	Теплопроводность, Вт / м · К	Температуропроводность $a$ , 10 <sup>7</sup> м <sup>2</sup> / с	Коэффициент линейного расширения $\alpha$ , 10 <sup>5</sup> К <sup>-1</sup>
Гелькоут (DION 9100)	1090	1,95	0,213	0,917	6,08
1ХСС	1167	1,912	0,24	0,99	5,89
2ХСС	1323	1,47	0,286	1,47	5,38
С	1815	0,72	0,44	3,37	3,219
Бетон	2000	0,84	1,35	8,035	0,54
Сталь-20	7860	0,476	80,3	21,6	1,2

Так, коэффициент теплопроводности гелькоута соответственно в 38; 6 и 2 раза ниже, чем металла, бетона и стеклопластика, хотя в то же время его коэффициент теплового расширения в 5, 11 и 3 раза выше. Естественно, что резкое изменение температуры поверхности анткоррозионного покрытия, которое может происходить в момент пуска технологического процесса или понижения до отрицательных значений температуры окружающей среды приводит к возникновению градиента температуры и связанной с этим нестационарной теплопроводности. Различие коэффициентов линейного расширения в условиях возникшего перепада температуры ведет к появлению на границе слоев в футеровке температурных напряжений. Хотя эти напряжения в полимерной матрице релаксируют во времени, тем не менее, если продолжительность действия температурных напряжений превышает долговечность полимера, происходит распространение слоя. Таким образом, при оценке безотказности стеклопластиковых футеровок в условиях резкого изменения температуры рабочей или окружающей среды важным фактором для анализа является оценка временной базы температурных напряжений в различных слоях строительной конструкции.

Уравнение нестационарной теплопроводности, возникающей при появлении температурного перепада имеет вид [3]:

$$\frac{dT}{dt} = a^2 \cdot \frac{d^2T}{dx^2}, \quad (1)$$

$$a = \sqrt{\lambda / c_p \cdot \gamma},$$

где  $T$  — температура, К;

$x$  — координата переноса тепла, м;

$t$  — время с начала теплопередачи, с;

$a$  — коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{К}$ ;

$c_p$  — теплоемкость,  $\text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{К}$ ;

$\gamma$  — плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Вместо абсолютных температур введем безразмерную, характеристическую температуру  $\theta$ , соответствующую условиям теплопередачи

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_{x,T} - T_0}, \quad (2)$$

где  $T_0$ ,  $T_{x,T}$  и  $T$  — соответственно температура рабочей среды, температура на границе слоев в объеме покрытия, где возникает скачок термических напряжений, и начальная температура изделия или конструкции,  $^{\circ}\text{C}$ . Уравнение нестационарной теплопроводности примет вид

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{a^2 \cdot d^2\theta}{dx^2}. \quad (3)$$

Частное решение для  $\theta$  находим в виде произведения пространственной и временной функций:

$$\theta(x; t) = X(x) \cdot Y(t). \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3), дифференцируя и преобразуя, получаем систему

$$\frac{Y'(\theta)}{Y(\theta)} = \frac{X''(x)}{X(x)} = -\lambda^2, \quad (5)$$

где  $\lambda^2$  — постоянная.

Из (5) получаем уравнения:

$$Y'(\theta) + \lambda^2 \cdot Y(\theta) = 0, \quad (6)$$

$$X''(x) + \lambda^2 \cdot X(x) = 0. \quad (7)$$

Подставим типовые решения уравнений (6) и (7) в (4)

$$\theta(x; t) = (A \cos \lambda \xi + B \sin \lambda \xi) \cdot \exp(-\lambda^2 \xi). \quad (8)$$

Для нахождения постоянных  $A$ ,  $B$  и  $\lambda$  вводим граничные и начальное условия:

$$\theta_{\xi=0} = -\Delta T, \quad (9)$$

$$\theta_{l-h; t} = 0, \quad (10)$$

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{h=0} = 0. \quad (11)$$

С учетом этих условий

$$B = 0, \cos [\lambda \cdot (l - h)] = 0, \lambda = \frac{(2\pi - 1) \cdot \pi}{2(l - h)} \text{ и } A = -\frac{4(-1)^{n+1} \cdot \Delta T}{(2\pi - 1) \cdot \pi}.$$

Для каждого значения характеристической температуры  $\theta(x; t)$  можно получить решение вида (8). Сумма этих решений также является решением уравнения (8).

После преобразования

$$\theta(x; t) = \frac{4}{\pi} \cdot \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{(-1)^{n+1} \cdot \cos(\lambda \cdot \xi) \cdot \exp(-\lambda^2 \cdot a \cdot t)}{2n-1}. \quad (12)$$

Переходя от характеристической к абсолютным температурам, проводя упрощения и ограничиваясь первым членом ряда разложения, получаем следующее уравнение:

$$\frac{T - T_0}{T_1 - T_0} = \frac{\pi}{4} \cdot \exp\left(\frac{-\pi^2 \cdot a \cdot t}{h^2}\right). \quad (13)$$

Решая уравнение относительно времени, находим зависимость для расчета температурных напряжений между слоями футерованной строительной конструкции

$$t = \frac{4 \cdot h^2}{\pi^2 \cdot a} \cdot \ln \frac{4(T - T_0)}{\pi(T_1 - T_0)}, \quad (14)$$

где  $h$  — толщина покрытия или расстояние от поверхности футеровки до соответствующего слоя, м;

$T_1$  — температура на противоположной границе слоя, °С.

На рис. 2 приведена зависимость времени достижения температуры  $T_1$  на границе футеровки и конструкционного слоя.

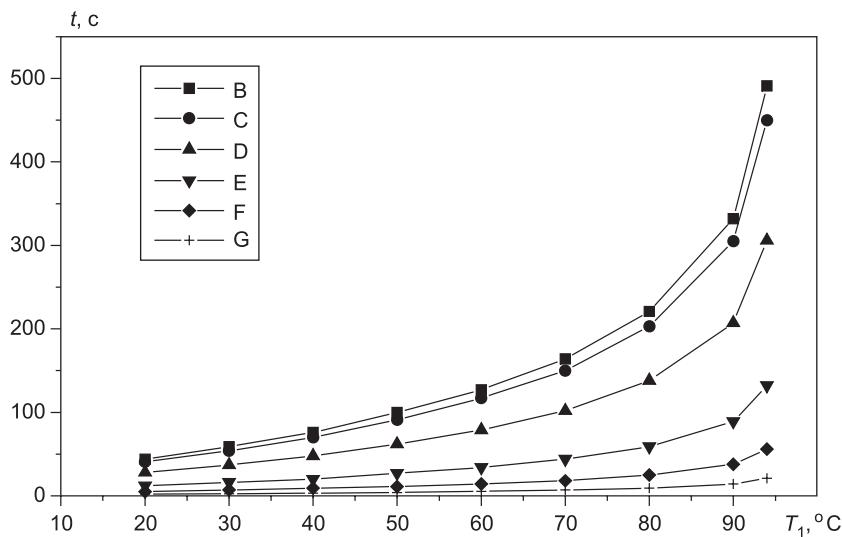


Рис. 2. Время достижения температуры  $T_1$  различными слоями стеклопластикового изделия при исходном перепаде ( $T_0 - T$ ), равном 85 °С и одинаковой толщине слоя 10 мм

В — гелькоут; С — 1ХСС; D — 2ХСС; Е — конструкционный стеклопластик;  
G — бетон; F — сталь-20

Например, температура 40 °С на противоположной стороне слоя будет достигаться в Г, 1ХСС, 2ХСС за соответственно 76, 70, 48 с, в то время как в конструкционном стеклопластике, бетоне и стали-20 всего за 20, 9 и 3 с.

Естественно, длительное действие температурных напряжений в слоях футеровки вызывает растрескивание наименее прочного гелькоут

слоя, разрушающее напряжение которого составляет  $70,5\text{--}78 \text{ МН}/\text{м}^2$ , что значительно ниже, чем первого и второго химстойких слоев, имеющих прочность соответственно 110 и  $136 \text{ МН}/\text{м}^2$ .

Полученная зависимость может быть использована для оптимизации состава и структуры футеровок стеклопластиковых, бетонных и металлических конструкций, оценки предельно допустимой толщины гелькоута, назначения эксплуатационных параметров оборудования и т.д. [4].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров, В.Г. Масштабный эффект свойств стеклопластиковых футеровок [Текст] / В.Г. Макаров, Р.М. Синельникова, А.П. Александров // Изв. вузов. Строительство. — 2007. — № 5. — С. 90–93.
2. Norpel Polyester Resins NORPOL DION Vinyl Ester and Bisphenol Resins: Каталог фирмы Reichhold, 1999. — 62 р.
3. Смирнов, В.И. Курс высшей математики [Текст] / В.И. Смирнов. — Т. 2. — М. : Госфизматиздат, 1962. — 628 с.
4. Makarov, V.G. Sudden failure of fine GRP products [Text] / V.G. Makarov, R.M. Sinelnikova. — Proceedings of the 68 Annual Technical Conference, Orlando, SPE. — Vol. 56. — P. 258–260 (2010).

МАКАРОВ В.Г., д-р техн. наук, проф.; E-mail: valgleb@yandex.ru

Самарский государственный технический университет

СИНЕЛЬНИКОВА Р.М., канд. техн. наук, доц.

Самарский государственный технический университет

КОСИЛОВА Д.В., асп.

Самарский государственный технический университет

КУЧЕРЕНКО А.Г., студ.

Самарский государственный технический университет

Получено 28.02.11

**Makarov V.G.**, doctor of technical sciences, professor, Samara State Technical University, Russia

**Sinelnikova R.M.**, candidate of technical sciences, assistant professor, Samara State Technical University, Russia

**Kosilova D.V.**, post-graduate student, Samara State Technical University, Russia

**Kucherenko A.G.**, student, Samara State Technical University, Russia

## CALCULATION OF NON-STATIONARY TEMPERATURE FIELDS IN GRP LININGS

Manifestation of the temperature stresses in GRP linings under sharp change of temperatures environments — a heatstroke is considered. The equation for calculation of time of existence of temperature difference between functional layers of fiberglass is received.

**Key words:** GRP linings, non-stationary heat conductivity, the temperature stresses.

## REFERENCES

1. Makarov, V.G. Scale effect of properties GRP linings [Text] / V.G. Makarov, R.M. Sinelnikova, A.P. Aleksandrov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2007. — N 5. — P. 90–93.
2. Norpel Polyester Resins NORPOL DION Vinyl Ester and Bisphenol Resins : The firm catalog of Reichhold, 1999. — 62 p.
3. Smirnov, V.I. Higher mathematics course [Text] / V.I. Smirnov. — Vol. 2. — M. : Cosfizmatizdat, 1962. — 628 p.
4. Makarov, V.G. Sudden failure of fine GRP products [Text] / V.G. Makarov, R.M. Sinelnikova. // Proceedings of the 68 Annual Technical Conference, Orlando, SPE. — Vol. 56. — P. 258–260 (2010).

## ВНЕДРЕНИЕ НАУЧНЫХ ДОСТИЖЕНИЙ В ПРОИЗВОДСТВО

УДК 627.514.2:624.139

А.М. СУХНО

### РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЯХ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Излагается опыт разработки и внедрения автоматизированной системы мониторинга безопасности на одном из хвостохранилищ, являющейся одним из способов повышения эксплуатационной надежности грунтовых сооружений на Крайнем Севере.

**Ключевые слова:** автоматизированная система мониторинга, грунтовые сооружения, Крайний Север.

Обеспечение устойчивости дамб хвостохранилищ остается одной из самых острых проблем промышленной гидротехники. Именно результаты натурных наблюдений являются единственным источником объективной информации о состоянии объектов. Контроль за фактическим состоянием технической и экологической безопасности гидротехнических сооружений особенно актуален для объектов, расположенных в криолитозоне, где ситуация может меняться в любое время и в результате климатических особенностей, и в результате высокой динаминости свойств мерзлых грунтов, а также особенностей технологического характера, присущих предприятиям горно-обогатительного комплекса. Поэтому для таких объектов на первое место встают вопросы непрерывного комплексного мониторинга безопасности в течение всего периода эксплуатации.

В настоящей статье рассмотрен комплекс наблюдений, определенный проектом, его недостатки и работы, проводимые службой эксплуатации по модернизации системы мониторинга на примере хвостохранилища Айхальского ГОКа (АГОК) АК «АЛРОСА».

Промышленные площадки АГОКа расположены на северо-западе Якутии вблизи Полярного круга. Климат района резко континентальный. Зима продолжительная, около 8 месяцев, холодная и малоснежная. Среднегодовая температура воздуха составляет  $-10^{\circ}\text{C}$ . Особенность района — наличие многолетнемерзлых грунтов мощностью более 600 м. Льдистость мерзлых пород достигает 45 %. Постоянная температура грунтов на глубине 10 м около  $3^{\circ}\text{C}$ .

Хвостохранилище принято в эксплуатацию в 1996 г., относится к сооружениям 1-го класса ответственности и предназначено для обеспечения водой технологического процесса и складирования отвальных хвостов обогатительной фабрики.

---

© Сухно А.М., 2011

В состав хвостохранилища входит *ограждающая дамба*, представляющая собой упорную призму с пионерной дамбой и дамбами обвалования. По температурному состоянию — талая. На сегодняшний день общая высота сооружения 90 м, из них 53 м возведено в процессе эксплуатации, при этом длина дамбы увеличилась с 760 до 1800 м (рис. 1). На конец эксплуатации хвостохранилища высота сооружения достигнет 107,5 м при длине 2500 м.



*Рис. 1. Ограждающая дамба хвостохранилища № 1*

Для вмещения зимних сбросов из пруда-отстойника хвостохранилища и аккумуляции излишков воды предусмотрена *маневровая емкость*. Створ плотины маневровой емкости расположен в 900 м ниже створа ограждающей дамбы. Основная каменно-земляная плотина талого типа высотой 32,6 м и длиной 860 м предназначена для создания емкости. Вдоль низового откоса устроена перехватывающая призма из суглинка, высотой до 9 м с отметкой гребня, повторяющей рельеф. С целью создания противофильтрационной льдогрунтовой завесы по гребню призмы установлены жидкостные (керосиновые) термосифоны, заглубленные в коренные мерзлые породы. В русловой части сооружения, перед завесой оборудован дренажный зумпф для сбора воды, фильтрующейся через тело основной плотины. Накапливающаяся вода откачивается насосами и возвращается в маневровую емкость. Таким образом, выполняются условия полной бессточности хвостохранилища.

Контроль состояния гидротехнических сооружений хвостохранилища осуществляется путем систематических наблюдений с помощью контрольно-измерительной аппаратуры (КИА), постоянных натурных наблюдений и периодических обследований. Соответствующие измерительные устройства позволяют проводить на сооружениях следующие виды измерений:

- пьезометрические — контроль фильтрационного режима и положения кривой депрессии в безнапорных пьезометрах. Измерения уровней воды производят с помощью рулетки с «хлопушкой»;
- деформационные — измерения осадок поверхностных марок, установленных на гребнях и бермах, осуществляемые путем нивелирования;
- температурные — контроль температурных распределений в грунтах, слагающих ГТС. Осуществляется с помощью медных сопротивлений (термодатчиков), объединенных в «плети» с интервалом 2 м и опущенных

в термоскважины (ТС). Глубина ТС назначается на 5 м ниже отметки коренных мерзлых пород. Замеры производят по каждой ТС отдельно с помощью переносных приборов (мостов сопротивления), подключаемых к термоплети посредством разъема в наземном сейфе скважины.

В процессе камеральной обработки результатов измерений пересчитывают сопротивления в температуры, составляют таблицы и строят графики. Полученные данные анализируются и устанавливается их соответствие проектным показателям, критериям безопасности сооружения.

Применяемая контрольно-измерительная аппаратура технически устарела и не соответствует современным требованиям по обеспечению безопасной эксплуатации ответственных гидротехнических сооружений. Недостатками КИА являются:

- трудность доступа к скважинам при неблагоприятных погодных условиях;
- сложность обработки результатов измерений;
- отсутствие возможности автоматизации;
- низкая точность измерений;
- невысокая оперативность получения результатов;
- нерегулярность наблюдений из-за отказов оборудования, проблемы восстановления пришедших в негодность измерительных скважин.

Основные причины выхода из строя КИА: негерметичность обсадной трубы ТС, в которую попадает влага и нарушает показания термодатчиков; закупорка скважин натечным льдом; замерзание воды в пьезометрах; вмерзание термоплетей и невозможность их извлечения для ремонта и тарировки. В таких условиях выбор наблюдательных точек и периодов наблюдений определяется техническими возможностями. В результате нерегулярных наблюдений нарушается целостность представлений об общих закономерностях изменения пьезометрического напора и температурного режима сооружения.

Сложные условия эксплуатации, повышенные современные требования к безопасности обязывают совершенствовать системы оперативного контроля состояния объектов повышенной опасности — гидротехнических сооружений. На основании этого и учитывая негативный опыт эксплуатации оборудованной на ГТС АГОКа системы контроля, было решено искать варианты ее усовершенствования. Наибольший интерес вызвала Автоматизированная система дистанционного мониторинга (АСДМ) «Плотина», созданная учеными московского Центра исследований экстремальных ситуаций (ЦИЭКС).

Специалистам ЦИЭКС предложено разработать АСДМ для гидросооружений АГОКа с учетом специфических свойств объектов наблюдений, эксплуатируемых в экстремальных условиях Крайнего Севера. Система должна отвечать следующим требованиям: максимальная автоматизация измерений и обработки результатов; надежная работа в любых погодных условиях; измерения уровня воды в пьезометрах с точностью не менее 1 см, в диапазоне глубин от 1 до 30 м; эффективная термоизоляция и влагозащита приборов, их ремонтопригодность. АСДМ должна обеспечивать сбор данных в режиме реального времени или с заданной периодичностью, отслеживать малейшие изменения в состоянии объектов, сравнивать результаты измерений с критическими значениями.

Экспериментальный комплекс высокоточного оборудования для непрерывного дистанционного мониторинга температурного и фильтрационного режимов ограждающей дамбы с соответствующим программным обеспечением силами ЦИЭКС был разработан, изготовлен и установлен на сооружении в 2007 г. Пьезометры оснащены погружными датчиками уровня воды

гидростатического типа, в которых предусмотрена компенсация перепадов атмосферного давления, влияющих на точность измерения. Первые из шести измерителей температур каждой термокосы расставлены с шагом 1 м, что позволяет наиболее точно измерять температуру грунта слоя сезонного ее колебания. Термоплети и измерители уровня воды подключаются к контроллерам — устройствам, осуществляющим первичный сбор данных по командам с центрального компьютера или беспроводного устройства (дата-логгера). Информация о температуре или уровне воды преобразуется в цифровой вид непосредственно в месте измерения и передается на центральный компьютер. Такой подход исключает погрешности, обусловленные передачей данных на значительные расстояния. Центральный компьютер расположен в помещении лаборатории геотехконтроля хвостового хозяйства и соединяется с измерительной сетью посредством радиомодема, при этом расстояние ограничено только пределами прямой видимости. Управляющая программа компьютера позволяет производить первичную настройку, управление работой системы, сбор и хранение информации в режиме реального времени или с заданной периодичностью, а также визуализацию результатов измерений в табличном и графическом виде (рис. 2).

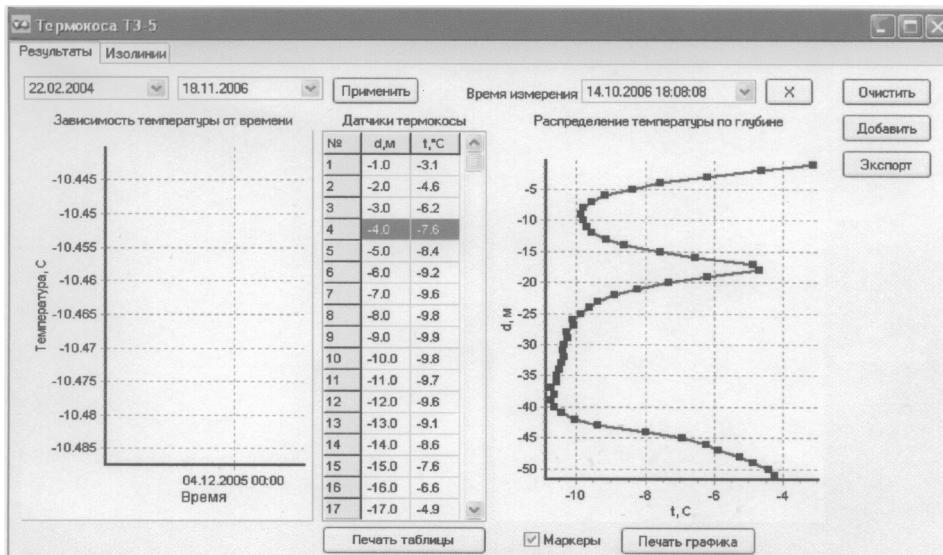


Рис. 2. Пример термометрических измерений, выведенных на рабочий стол центрального компьютера АСДМ

Установленное на дамбе оборудование (термокосы, пьезодатчики, устройства считывания информации и программы их обработки) успешно прошло испытания в разных климатических условиях. Анализ результатов испытаний позволил произвести доработку устройств и программного обеспечения, направленную на улучшение технико-эксплуатационных характеристик системы и продолжить работу по модернизации КИА.

На сегодняшний день высокоточными цифровыми системами измерений оборудовано 60 % КИА гидрооружий хвостохранилища. Часть термоскважин и пьезометров работают в дистанционном режиме по радиомодему, остальные оснащены устройствами автоматического измерения температур (логгерами). Дистанционный доступ к измерительному оборудованию осуществляется с центрального компьютера, при этом расстояние до наиболее удаленных наблюдательных скважин достигает

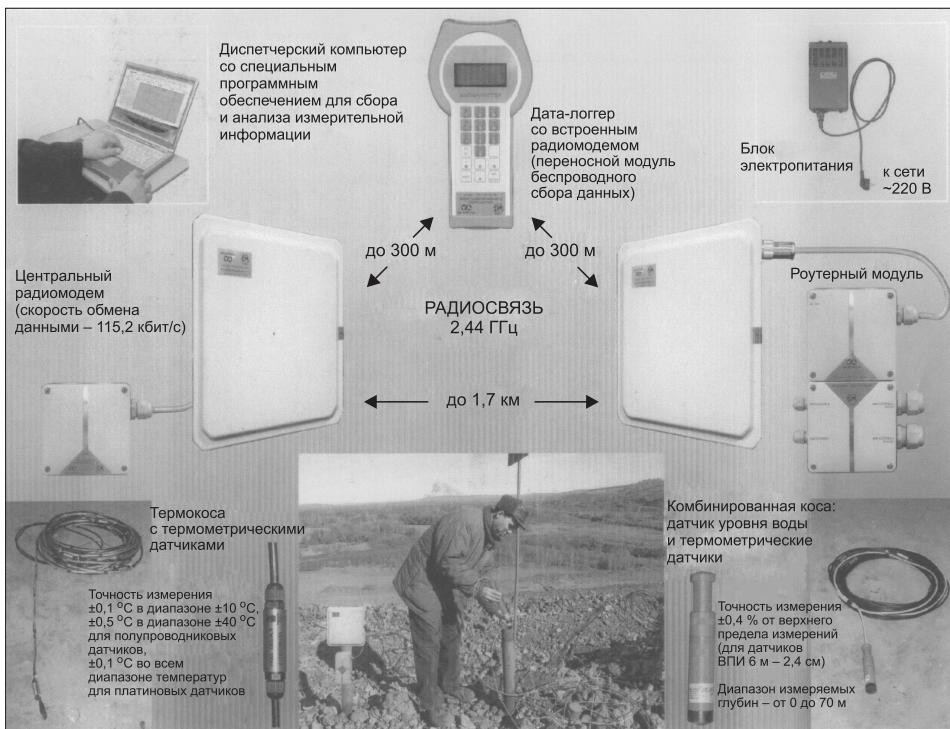


Рис. 3. Оборудование и принцип работы АСДМ

1,5 км. Измерения с логгеров считаются посредством ноутбука из автомашины по кабелю, подключаемому к скважине.

В связи с тем что в ходе эксплуатации хвостохранилища ведется неизбежное увеличение его параметров с целью вмещения новых отходов обогащения, возрастают потенциальная опасность сооружений в случае аварий. Это предполагает оборудование новых створов контрольно-измерительной аппаратуры, на основании чего было принято решение — при расширении сети КИА подключать ее к АСДМ.

На рис. 3 представлены общие характеристики АСДМ, типовая схема расположения показана на рис. 4.

Назначение системы — постоянный контроль за температурным и фильтрационным режимом гидротехнических сооружений. Система разработана на основе применения современных высокоточных средств измерения, передачи данных и специализированного программного обеспечения, позволяющего проводить анализ получаемых результатов о состоянии объекта наблюдений, вести долгосрочную базу измерений, формировать различные типы отчетных документов. В системе заложены модульный характер построения аппаратной части и расширение ее функциональных возможностей в зависимости от изменения характеристик объекта мониторинга, изменения состава контрольно-измерительной аппаратуры. Система легко настраивается на свойства любого сооружения вне зависимости от его особенностей.

Измерительные устройства системы объединяются в сеть для передачи информации по электрическому кабелю или по радиоканалу. Радиосредства в измерительной сети позволяют оптимизировать ее структуру. Существуют отдельные участки трассы, где прокладка кабеля либо невозможна, либо затруднена — дороги, коммуникации, длинные участки

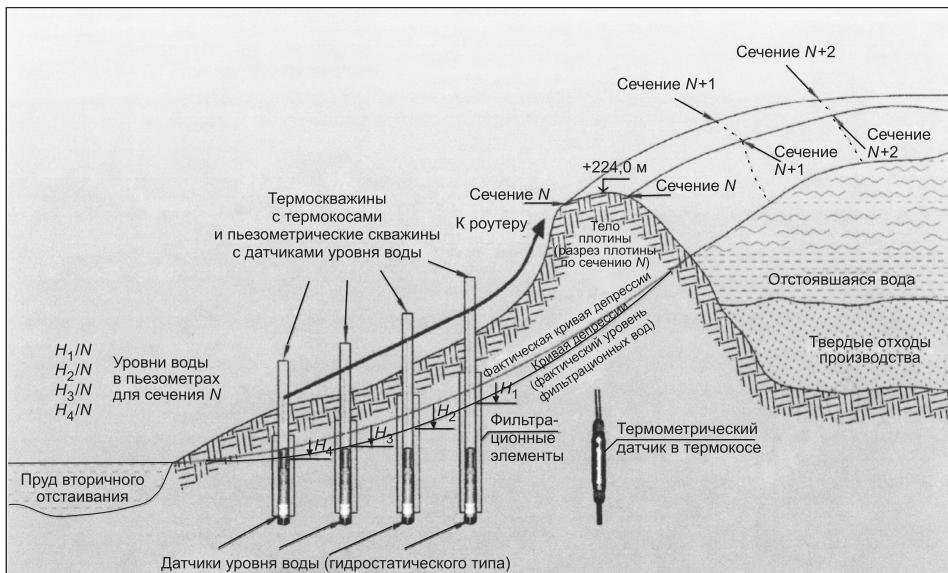


Рис. 4. Типовая схема расположения АСДМ на дамбе хвостохранилища

трасс, водные преграды. Средства радиосвязи позволяют легко обходить эти препятствия и обеспечивать связь на расстояние нескольких километров. Применение радиосредств в условиях большого пространственного разброса контролируемых объектов придает ей важные свойства универсальности. В системе применены высокоскоростные кабельно-радиомодемные средства передачи данных на основе современных промышленных сетевых протоколов. Аппаратная часть системы максимально адаптирована к возможности применения в суровых климатических условиях. Измерительные устройства системы могут работать в сетевом, автономном и комбинированном режимах.

Сетевой режим работы оборудования — его объединение в пределах объекта наблюдений в сеть посредством кабеля и радиосредств. Электропитание элементов полученной измерительной системы осуществляется дистанционно по кабелю. Также по кабелю передаются информационные и управляющие сигналы. Измерения проводятся централизованно по командам с центрального компьютера, с одного компьютера можно обращаться к разным сетям.

При отсутствии возможности или необходимости организации сетевой системы оборудование может работать в автономном режиме, при этом питание осуществляется от литиевых батарей. Измерения происходят по таймеру, режим работы которого программируется заранее. Результаты измерений в заданное время считываются и накапливаются соответствующими устройствами — дата-логгерами. Таймерный режим работы предполагает экономичный разряд батареи, при котором основное потребление происходит при измерении, в остальное время оборудование находится в отключенном состоянии, работают только часы и таймеры с минимальным потреблением электроэнергии.

Измерения могут проводиться в ручном и автоматическом режимах. Посылка запроса в автоматическом режиме осуществляется программно с заранее установленным периодом измерений. Прием и сохранение результатов измерений производятся также автоматически. В случае, если измеряемые параметры приблизились к критическим значениям, система выдает предупредительный сигнал. В промежутках между из-

мерениями в автоматическом режиме система проводит автоматические запросы с целью контроля наличия связи, работоспособности аппаратуры, целостности кабеля. Если после очередного запроса не отвечает какой-либо прибор, система немедленно информирует об этом. В системе предусмотрена возможность оповещения о несанкционированном доступе к оборудованию.

АСДМ позволяет связать весь комплекс аппаратно-технических средств в единую систему и выполняет следующие задачи:

- обеспечивает пользователю необходимый диалоговый интерфейс;
- обеспечивает сопряжение компьютера с аппаратным уровнем системы и программным обеспечением микроконтроллерных средств;
- поддерживает необходимые сетевые протоколы и содержит механизм для взаимодействия с зарегистрированными устройствами системы;
- обеспечивает создание баз данных и накопление статистической информации об уровнях фильтрационных вод в скважинах, данных температурных измерений;
- обеспечивает визуализацию информации в виде, удобном для пользователя — табличном, графическом или трехмерном;
- имеет средства автоматического оповещения в случаях приближения измеряемых параметров к критическим отметкам.

Цель визуализации измерений — предварительный анализ полученных данных, качественная оценка существующей динамики изменения свойств объекта. Программное обеспечение имеет средства автоматического формирования печатных отчетов и экспорта результатов измерений в другие программы.

Отметим очевидные преимущества применения автоматизированной системы дистанционного мониторинга:

- применение цифровых средств измерения нового поколения и соответствующих технологий их монтажа позволяет исключить проблемы, связанные с выходом из строя как собственно скважин, так и установленного в них оборудования;
- данные замеров могут быть получены в любой момент оперативно и достоверно, без соответствующего этапа камеральной обработки;
- возможность работы в режиме реального времени, большой объем накопленной информации, специализированные программные средства анализа и прогнозирования, возможности предупреждения и оповещения об аварийных ситуациях;
- благодаря дистанционным средствам исключена зависимость доступа от погодных условий к удаленным точкам контроля.

**Выводы.** Рассматриваемая в статье система мониторинга принадлежит к числу высокоточных средств измерения, хранения и передачи данных, основанных на цифровых технологиях и широком применении компьютерных систем. Оперативная обработка ее специализированными программами позволяет достоверно и своевременно оценивать фактическое состояние объекта и прогнозировать его поведение.

В современных условиях при возрастающих требованиях к безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений внедрение автоматизированных систем мониторинга является настоятельной и актуальной необходимостью. Это подтверждается руководящими и нормативными документами по безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сухно, А.М. Автоматизированная система мониторинга на хвостохранилище Айхальского ГОКа [Текст] / А.М. Сухно, Н.Н. Хлапов. — Горн. журн. — 2008. — № 5.
2. Каган, А.А. Инженерно-геологический мониторинг гидротехнических сооружений в криолитозоне [Текст] / А.А. Каган, Н.Ф. Кривоногова. — Гидротехническое строительство. — 2003. — № 3.
3. Бутюгин, В.В. О контроле безопасности промышленных отходов и проблемах их эксплуатации [Текст] / В.В. Бутюгин, Б.С. Пыхтин. — Гидротехническое строительство. — 2004. — № 1.

*СУХНО А.М., зам. гл. инж., Айхальский ГОК АК «АЛРОСА»  
Республика Саха (Якутия)*

Получено 02.03.11

**Suhno A.M.**, substituent of chief engineer, Aichal MEP CL «ALROSA», Republic Sakha (Yakutiya), Russia

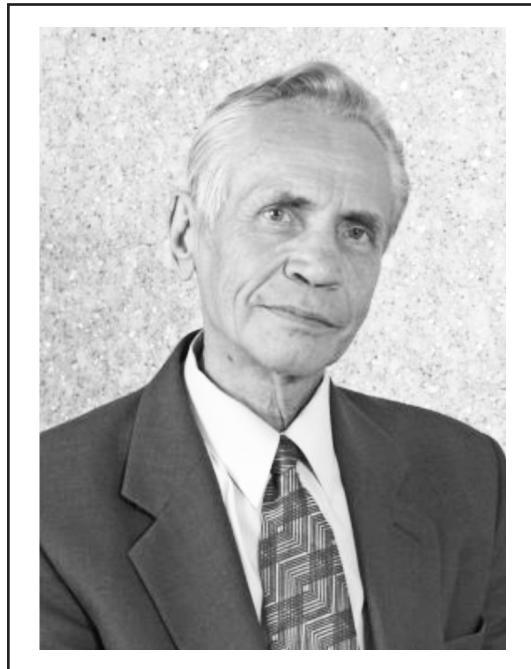
### **DEVELOPMENT AND INTRODUCTION OF AUTOMATICAL REMOTABILITY FOR MONITORING HYDRAULIC STRUCTURES IN FAR NORTH CONDITIONS**

In the article experience development and introduction of automatical system monitoring safety same of Aichal MEP tailing storage, one of method increase operation capacity ground hydraulic structures in Far North.

**Key words:** automated system monitor type, earthfill hydraulic structures, Extreme North.

### REFERENCES

1. Suhno, A.M. The automatical system monitoring on Aihal MEP tailing storage [Text] / A.M. Suhno, N.N. Hlapov. — Mountain magazine. — 2008. — N 5.
2. Kagan, A.A. Engineering-geological monitoring of hydraulic engineering constructions in cryolithozone [Text] / A.A. Kagan, N.F. Krivonogova. — Hydrotechnical construction. — 2003. — N 3.
3. Butyngin, V.V. On control of safety of industrial wastes and problems of their operations [Text] / V.V. Butyngin, B.S. Pyhtin. — Hydrotechnical construction. — 2004. — N 1.



## ПАМЯТИ УЧЕНОГО, ПЕДАГОГА

15 февраля 2011 г. трагически ушел из жизни Юрий Андреевич Попов — крупный ученый, педагог и замечательный человек, профессор кафедры технологии строительного производства Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин).

Ю.А. Попов родился в 1938 г. в г. Омске. В 1960 г. окончил Новосибирский институт инженеров водного транспорта. Работал научным сотрудником в Промпроекте в 1960–1961 гг., с 1961 по 1974 г. в Новосибирском филиале ЦНИИСтранс и с 1974 г. до последних дней трудился в НГАСУ (Сибстрин). Здесь он защитил кандидатскую (1976 г.), а затем и докторскую диссертацию (1983 г.). Стал профессором кафедры гидротехнических сооружений и гидравлики (1985 г.). Являлся членом-корреспондентом СО Академии наук высшей школы и Жилищно-коммунальной академии.

По проблемам гидромеханизации земляных работ опубликовал более 130 научных работ, в том числе три монографии в центральных издательствах. Подготовил одного доктора и 8 кандидатов наук. В области технологии зимнего бетонирования, где в последние годы Ю.А. Попов много и плодотворно работал, им опубликовано в соавторстве с учениками две монографии, более 50 научных работ. Подготовил 6 кандидатов наук.

Работал деканом гидротехнического факультета (1983–1984 гг.), проректором по научной работе (1985–1990 гг.), заведующим кафедрами гидротехнических сооружений и гидравлики (1991–1994 гг.) и технологии строительного производства (1998–2008 гг.).

На протяжении долгих лет Юрий Андреевич входил в состав редакционной коллегии нашего журнала. Много сил и энергии Ю.А. Попов отдавал повышению уровня инженерной и фундаментальной подготовки студентов, магистрантов, аспирантов и докторантов. Более 10 лет являлся председателем диссертационного совета по специальностям «Технология строительного производства» и «Строительные материалы», лауреат премии Совета Министров СССР (1990 г.), заслуженный деятель науки и техники, почетный работник высшего профессионального образования России (1990 г.).

Светлая память о Юрии Андреевиче сохранится в сердцах его учеников, последователей, коллег и знакомых.

## **ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ<sup>1</sup>**

- 1.** К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:  
— *сопроводительное письмо* руководства организации, откуда исходит рукопись;

**к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи<sup>2</sup> за 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 Стг 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 следуют набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. *Русские и греческие буквы* и индексы, а также *цифры*, *аббревиатуры* и *стандартные функции* (Re, cos и др.) набираются *прямым шрифтом*. *Латинские буквы* набирать *курсивом*. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др.), а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и *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).

<sup>1</sup> С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

<sup>2</sup> На 2011 г. — из расчета 650 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

**8.** Следует применять физические величины и их обозначения, соответствующие стандарту СТ. СЭВ 1052–78 (СН 528–80).

**9.** В библиографический список включаются только те работы, которые опубликованы в печати, составленные в соответствии с ГОСТ 7.80–2000, ГОСТ 7.1–03.

Примеры оформления можно найти на Internet-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу [www.sibstrin.ru](http://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.

ББК 38  
И 33  
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов  
СТРОИТЕЛЬСТВО**

**№ 4 (628) 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*