

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

№ 7–8 (643–644)
Июль–август 2012 г.

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

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

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

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 27.08.12. Формат 70×108 1/16.
Усл. печ. л. 11,5+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 1028.

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Горынин Г.Л., Немировский Ю.В. GN-теория расчета композитной балки при изгибе. Сообщение 2. Размерная теория и пример

3

Дукарт А.В., Фам Тхань Бинь. Оптимальные па-

раметры и эффективность ударного гасителя колебаний для локальной виброзащиты гибких элементов, опирающихся на массивную конструкцию при действии на нее периодических импульсов

12

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Высоцкая М.А., Фёдоров М.Ю., Кузнецов Д.А. Адсорбционная и структурирующая активность перлита как наполнителя для асфальтобетона

21

Канаев А.Ю., Христофорова И.А., Христофоров А.И. Пеносиликат, модифицированный железоисксидными промышленными отходами

27

Кононов А.Н., Зимакова Г.А. Взаимодействие гидроактивного полиуретана с водой

32

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

Сколубович Ю.Л., Бойко О.А., Зеркаль С.М., Рогазинский С.В., Войтов Е.Л., Сколубович А.Ю. Численное моделирование процесса очистки водных

растворов в псевдоожженном слое контактной массы	38
Костин В.И. Регулирование работы насосов и вентиляторов при совместной работе	45
Рафальская Т.А. Прогнозирование переменных режимов работы тепловых пунктов в условиях повышенного графика центрального регулирования	50
СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ	
Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Грузин А.В., Крутиков Е.И., Попов Д.А., Мельникова А.С. Принципиальные схемы бесклапанных пневмоударных механизмов с неподвижным стержнем и их физико-математическое описание	62
НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ	
Вольская Л.Н., Королев В.В. Некоторые особенности сложения и развития градоэкологического каркаса крупных городов Западной Сибири в XVII–XXI вв.	73
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Ананин В.Г., Осипов С.П., Попов М.Ю., Федяев Р.В. Математическая модель процесса аварийного торможения лифтов и подъемников с упругой связью	83
Виноградов А.Б., Ломухин В.Б., Сургин В.В. Применение модификатора моторного масла на основе серпентина и мягких металлов при эксплуатации земснаряда типа ДЭР-250	90
Катюшин В.В. Оценка влияния податливости фланцевых соединений на изгибную устойчивость центрально-сжатых стоек	96
Мойсейчик Е.А., Шафрай С.Д. О деформационном теплообразовании в элементах стальных строительных конструкций из низкоуглеродистой стали	101
Романович А.А. Устройство для подачи анизотропных материалов в пресс-валковый измельчитель	110
В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ	
Кравченко П.А., Парамонов В.Н. Эффект увеличения несущей способности свай усиления под нагрузкой	117
ВНЕДРЕНИЕ НАУЧНЫХ ДОСТИЖЕНИЙ В ПРОИЗВОДСТВО	
Толстой М.Ю., Вилор Н.В., Ярина Н.А., Баймачев Е.Э. Развитие теплоснабжения с применением теплонасосных установок–станций	123
НАУЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ	
Владимиров С.А. Комплексное исследование проблем ценообразования крупномасштабных инвестиционно-строительных проектов	129

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 539.3

Г.Л. ГОРЫНИН, Ю.В. НЕМИРОВСКИЙ

GN-ТЕОРИЯ РАСЧЕТА КОМПОЗИТНОЙ БАЛКИ ПРИ ИЗГИБЕ^{*} Сообщение 2. РАЗМЕРНАЯ ТЕОРИЯ И ПРИМЕР^{}**

В работе [1] построена теория изгиба композитных балок произвольного симметричного сечения в безразмерной форме. Данная статья является продолжением этой работы. Построена размерная теория и теория Эйлера—Бернулли для композитных балок. Произведено сравнение с уточненной теорией Тимошенко.

Ключевые слова: композит, слоистая балка, кромочный эффект.

Теория изгиба в размерных переменных. Перепишем уравнение (31), взятое из работы [1] (в дальнейшем при ссылке на формулы из данной работы будем использовать обозначения, подобные следующему (31, [1])), в размерных переменных, используя при этом формулы (11, [1]),

$$\frac{d^4 u_0}{dz^4} = \frac{p_x}{[EJ]} - \frac{\beta}{[GF]} \frac{d^2 p_x}{dz^2}, \quad (1)$$

где

$$\beta = \frac{\zeta h^2 [GF]}{[EJ]}, \quad [GF] = \sum_{i=1}^s (\mu_{zx})_i F_i, \quad [EJ] = \sum_{i=1}^s E_i J_i = D_1 \tilde{E} h^4, \quad (2)$$

условие выполнимости теории:

$$\Delta = \zeta^2 h^4 \frac{d^4 p_x}{dz^4} / p_x \ll 1. \quad (3)$$

Для уравнения (1) удобно ввести понятие приведенной поперечной нагрузки p_x^* с помощью первого равенства (2), подобно тому, как это было сделано для уравнения (31, [1]):

$$\frac{d^4 u_0}{dz^4} = \frac{p_x^*}{[EJ]}, \quad p_x^* = p_x - \zeta h^2 \frac{d^2 p_x}{dz^2}. \quad (4)$$

Из равенств (32, [1]) и (33, [1]) следуют равенства на угол наклона поперечного сечения, изгибающий момент и поперечное усилие:

$$\varphi = \frac{du_0}{dz} - \frac{\alpha}{[GF]} \left(Q_x + \zeta h^2 \frac{dp_x^*}{dz} \right), \quad \alpha = \frac{K_\varphi h^2 [GF]}{[EJ]}; \quad (5)$$

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 12-01-90405-Укр_a).

** Сообщение 1 в № 6 2012 г.

$$M_y = -[EJ] \left(\frac{d^2 u_0}{dz^2} + \frac{\beta}{[GF]} p_x^* \right), \quad Q_x = -[EJ] \left(\frac{d^3 u_0}{dz^3} + \frac{\beta}{[GF]} \frac{dp_x^*}{dz} \right). \quad (6)$$

Использование равенств (5), (6) позволяет поставить четыре краевых условия для уравнения изгиба (4): свободный край — $M_y = Q_x = 0$, жесткая заделка — $\varphi = u_0 = 0$, шарнирное опирание — $M_y = u_0 = 0$ и т.д.

Первые два слагаемых в первой формуле (5) для угла наклона сечения совпадают с правой частью формулы (10, [1]), полученной в рамках теории Тимошенко, разница только в том, что вторая формула (5) и вторая формула (21, [1]) дают простой алгоритм для нахождения коэффициента формы α , а в рамках теории Тимошенко вопрос о нахождении этого коэффициента не решен. Первая и вторая формулы (6) для изгибающего момента и поперечного усилия отличаются от первой формулы (6, [1]) и формулы (8, [1]) тем, что вместо коэффициента формы α стоит коэффициент β , вычисляемый по первой формуле (2). Этим же отличается уравнение изгиба балки (1) от уравнения изгиба Тимошенко (9, [1]), вместо коэффициента α стоит коэффициент β . Таким образом, для случая однородной балки из изотропного материала предлагаемая GN-теория изгиба балки весьма похожа на теорию Тимошенко, хотя и не совпадает с ней. Совпадение особенно сильно для случая равномерной распределенной нагрузки, в этом случае третье слагаемое из первой формулы (5) равняется нулю, и эта формула совпадает с формулой (10). Следует отметить, что экспериментальной проверке теория Тимошенко подвергалась только для случая сосредоточенных сил и равномерно распределенной нагрузки. Для случая же меняющихся распределенных сил, когда слагаемое с производной поперечной нагрузки становится существенным, эксперименты, по-видимому, отсутствуют [2].

Уравнение изгиба (1) и выражение для угла наклона сечения (5) записаны с помощью коэффициентов α и β только с целью сравнения полученных результатов с теорией Тимошенко. В целом же из двух равенств (5), уравнения (1) и первого равенства (2) следует, что такая форма записи является искусственной, в частности величина $[GF]$ везде сокращается и не оказывает никакого влияния на величины прогибов и напряжений, поэтому вместо коэффициентов α и β более физично использовать соответствующие им безразмерные коэффициенты K_φ и ζ , в частности уравнение (1) в дальнейшем будем записывать именно в виде (4). Формулу для угла поворота сечения (5) и выражения для внутренних усилий (6) перепишем в следующем виде, введя размерные коэффициенты \tilde{K}_φ и $\tilde{\zeta}$:

$$\varphi = \frac{du_0}{dz} - \frac{\tilde{K}_\varphi}{[EJ]} \left(Q_x + \tilde{\zeta} \frac{dp_x^*}{dz} \right), \quad \tilde{K}_\varphi = K_\varphi h^2, \quad \tilde{\zeta} = \zeta h^2; \quad (7)$$

$$M_y = -[EJ] \left(\frac{d^2 u_0}{dz^2} + \frac{\tilde{\zeta}}{[EJ]} p_x^* \right), \quad Q_x = -[EJ] \left(\frac{d^3 u_0}{dz^3} + \frac{\tilde{\zeta}}{[EJ]} \frac{dp_x^*}{dz} \right). \quad (8)$$

Для получения формул для напряжений в размерном виде введем размерные жесткостные функции, выразив их через безразмерные:

$$(\tilde{\tau}_{zz})_i = (\tau_{zz})_i \tilde{E}h, \quad (\tilde{\tau}_{\alpha\beta})_i = (\tau_{\alpha\beta})_i \tilde{E}h, \quad (\tilde{\tau}_{az})_i = (\tau_{az})_i \tilde{E}h^2, \quad (\tilde{\tau}_{az})_i^* = (\tau_{az})_i^* \tilde{E}h^4, \quad (9)$$

$$(\tilde{\tau}_{\alpha\beta})_i^* = (\tau_{\alpha\beta})_i^* \tilde{E}h^3, \quad (\tilde{U}_\alpha)_i = (U_\alpha)_i h^2, \quad (\tilde{U}_z)_i = (U_z)_i h^3, \quad \alpha, \beta \in \{x, y\},$$

тогда формулы для напряжений (34, [1]), (35, [1]) могут быть записаны с помощью этих функций:

$$(\sigma_{\alpha z})_i = -(\tilde{\tau}_{\alpha z})_i \frac{Q_x}{[EJ]} + \frac{1}{[EJ]} ((\tilde{\tau}_{\alpha z})_i^* - \tilde{\zeta}(\tilde{\tau}_{\alpha z})_i) \frac{dp_x^*}{dz}, \quad \alpha, \beta \in \{x, y\}; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} (\sigma_{zz})_i &= -(\tilde{\tau}_{zz})_i \frac{M_y}{[EJ]} + ((\tilde{\tau}_{zz})_i^* - \tilde{\zeta}(\tilde{\tau}_{zz})_i) \frac{p_x^*}{[EJ]}, \\ (\sigma_{\alpha \beta})_i &= -(\tilde{\tau}_{\alpha \beta})_i \frac{M_y}{[EJ]} + ((\tilde{\tau}_{\alpha \beta})_i^* - \tilde{\zeta}(\tilde{\tau}_{\alpha \beta})_i) \frac{p_x^*}{[EJ]}. \end{aligned} \quad (11)$$

Из формулы (10) следует, что не только главная составляющая касательного напряжения σ_{xz} пропорциональна перерезывающей силе Q_x , но это верно и в отношении напряжения σ_{yz} , чем больше поперечная сила, тем больше касательные напряжения в сонаправленном и перпендикулярном к ней направлениях, и оба эти напряжения обратно пропорциональны изгибной жесткости в плоскости Oxz . Аналогично формулы (11) показывают, что не только главная составляющая напряжений σ_{zz} , но и главная составляющая напряжений σ_{xx} , σ_{xy} , σ_{yy} прямо пропорциональна изгибающему моменту M_y , и все они обратно пропорциональны изгибной жесткости.

В случае выполнения условия совместности слоев (47, [1]) справедливы формулы (48, [1]), тогда выражения (11) принимают вид

$$\begin{aligned} (\sigma_{zz})_i &= x(E_z)_i \frac{M_y}{[EJ]} + ((\tilde{\tau}_{zz})_i^* + x\tilde{\zeta}(E_z)_i) \frac{p_x^*}{[EJ]}, \\ (\sigma_{\alpha \beta})_i &= (\tilde{\tau}_{\alpha \beta})_i^* \frac{p_x^*}{[EJ]}, \quad \alpha, \beta \in \{x, y\}. \end{aligned} \quad (12)$$

Из сравнения формул (11) и (12) следует, что именно те контактные напряжения σ_{xx} , σ_{xy} , σ_{yy} , которые возникают между слоями в случае нарушения условия (47, [1]), как раз являются прямо пропорциональными изгибающему моменту M_y . Кромочные напряжения, которые могут достигать достаточно больших значений и быть причиной расслоения балки, являются частным случаем описанной ситуации, поэтому из формул (10), (11) следует, что эти кромочные контактные напряжения принимают наибольшие значения в тех сечениях балки, где велико значение изгибающего момента M_y и поперечного усилия Q_x . Из этих же формул следует важный вывод, что с кромочными эффектами в слоистой балке можно бороться за счет увеличения изгибной жесткости $[EJ]$.

Если воспользоваться выражениями (7) и (8) и подставить их в третье равенство (17, [1]), то для продольных перемещений будет справедлива следующая формула:

$$u_z = -x\varphi - \frac{(\tilde{U}_z + x\tilde{K}_\phi)}{[EJ]} \left(Q_x + \tilde{\zeta} \frac{dp_x^*}{dz} \right). \quad (13)$$

Первое слагаемое в правой части равенства (13) — это поворот сечения как единого целого на угол φ , второе слагаемое — это депланация сечения, форма депланации сечения в соответствии со второй формулой (21, [1]) полностью определяется функцией \tilde{U}_z , эту функцию в дальнейшем будем называть функцией депланации, главная часть амплитуды де-

планации пропорциональна поперечному усилию и обратно пропорциональна изгибной жесткости балки. В теории Тимошенко из формул (4, [1]) и (10, [1]) следует, что депланация сечения может быть уменьшена за счет сдвиговой жесткости GF , однако там это является гипотезой, введенной Тимошенко. В действительности же, с точки зрения пространственной теории упругости, как это следует из формул (7) и (13), величина $[GF]$ не обладает этим свойством, но этим свойством обладает изгибная жесткость $[EJ]$, т.е. функционально изгибная жесткость одновременно выполняет роль и сдвиговой жесткости тоже.

Теория Эйлера—Бернулли для слоистой балки. Если положить равными нулю константы K_ϕ и ζ , то это автоматически повлечет за собой, как это следует из равенств (21, [1]), (27, [1]), (44, [1]) и (9), обнуление следующих жесткостных функций:

$$\tilde{U}_z = (\tilde{\tau}_{zz})_i^* = (\tilde{\tau}_{\alpha\beta})_i^* = (\tilde{\tau}_{az})_i^* = 0, \quad \tilde{K}_\phi = \tilde{\zeta} = 0.$$

А если все эти нули подставить в уравнение изгиба (4), формулы для угла наклона сечения и внутренних усилий (7), (8), выражение для продольных перемещений (13), формулы для напряжений (10), (11), то получим теорию изгиба, которую логично назвать обобщением теории Эйлера — Бернулли на случай слоистой композитной балки, так как по-перечное сечение в такой теории, очевидно, остается плоским и перпендикулярным средней линии после приложения нагрузки:

$$\frac{d^4 u_0}{dz^4} = \frac{p_x}{[EJ]}, \quad \Phi = \frac{du_0}{dz}, \quad M_y = -[EJ] \frac{d^2 u_0}{dz^2}, \quad (14)$$

$$Q_x = -[EJ] \frac{d^3 u_0}{dz^3}, \quad u_z = -x \frac{du_0}{dz};$$

$$(\sigma_{zz})_i = -(\tilde{\tau}_{zz})_i \frac{M_y}{[EJ]}, \quad (\sigma_{\alpha\beta})_i = -(\tilde{\tau}_{\alpha\beta})_i \frac{M_y}{[EJ]}, \quad (15)$$

$$(\sigma_{az})_i = -(\tilde{\tau}_{az})_i \frac{Q_x}{[EJ]}, \quad \alpha, \beta \in \{x, y\}.$$

Таким образом, теория Эйлера—Бернулли для слоистой балки является упрощением предлагаемой GN-теории. Интересно отметить, что согласно формулам (15) изучение кромочных межслойных эффектов вполне возможно в рамках теории Эйлера—Бернулли [2]. В случае же выполнения условия совместности слоев (47, [1]), кромочные эффекты отсутствуют и равенства (15) принимают вид

$$(\sigma_{zz})_i = x(E_z)_i \frac{M_y}{[EJ]}, \quad (\sigma_{\alpha\beta})_i = 0, \quad (16)$$

$$(\sigma_{az})_i = -(\tilde{\tau}_{az})_i \frac{Q_x}{[EJ]}, \quad \alpha, \beta \in \{x, y\}.$$

Предлагаемая GN-теория изгиба балки обладает свойством универсальности, она позволяет рассчитывать балки с произвольным симметричным сечением, произвольным числом слоев, материал которых принадлежит достаточно широкому классу ортотропных упругих материалов (15, [1]). В результате ее применения удается определить все шесть компонент тензора напряжений и депланацию сечения в явном виде по формулам (58), (59), (61). Однако главным условием ее применения является

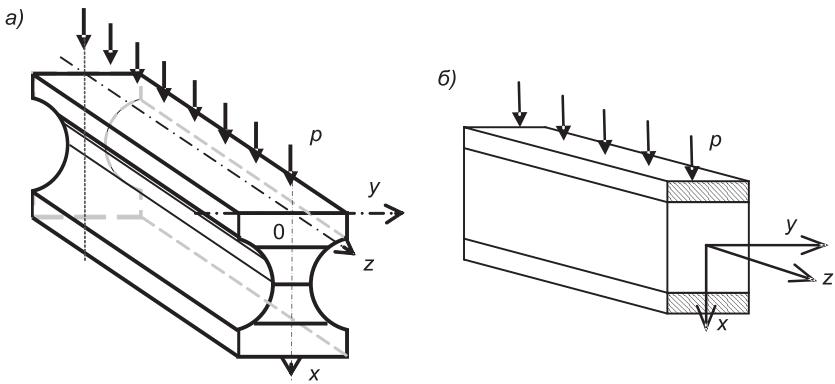


Рис. 1. Слоистая балка под действием поперечной нагрузки
а — слоистый двутавр, б — трехслойная балка

ся умение решать три краевые задачи в сечении балки (30, [1])–(39, [1]) и (40, [1])–(45, [1]), в отличие от нее теория Тимошенко не знает такого рода проблем. Решение указанных трех краевых задач в сечении балки в общем случае является сложной задачей, не поддающейся аналитическому решению и требующей привлечения численных методов. Однако существует достаточно широкий класс балок, для которых указанные задачи допускают аналитическое решение, это тонкостенные слоистые балки (швеллеры, двутавры, уголки и пр.), механические характеристики слоев которых удовлетворяют условию совместности (47, [1]).

Трехслойная балка прямоугольного сечения, состоящая из изотропных материалов. Рассмотрим трехслойную балку прямоугольного сечения, для которой крайние слои выполнены из одного материала, а средний слой из другого, причем b — ширина сечения, h , H — высота крайнего и среднего слоев; E_n , E_c — модули Юнга для крайнего и среднего слоев соответственно, коэффициент Пуассона ν одинаков для всех слоев, слои занумерованы сверху вниз (рис. 1, б), константы вычисляются согласно равенствам:

$$(E_z)_1 = (E_z)_3 = E_n, \quad (E_z)_2 = E_c, \quad (17)$$

$$(\mu_{zx})_1 = (\mu_{zx})_3 = 0,5E_n / (1 + \nu), \quad (\mu_{zx})_2 = 0,5E_c / (1 + \nu).$$

В безразмерных переменных значения координаты x меняются от $-0,5$ до $0,5$. Введем операцию усреднения произвольной функции по ширине сечения:

$$\langle f \rangle = \frac{1}{b} \int_{-0.5b}^{0.5b} f(x, y) dy. \quad (18)$$

Решаем краевую задачу (36, [1])–(39, [1]), для этого применим операцию усреднения (18) к уравнению (36, [1]), воспользуемся четвертым равенством (48, [1]) и учтем равенства (37, [1]), (38, [1]):

$$\frac{d \langle \tau_{zx} \rangle_i}{dx} = x(E_z)_i, \quad (19)$$

проинтегрируем его с учетом условий (38, [1])

$$\langle \tau_{zx} \rangle = \int_{-0.5}^x (E_z)_i \xi d\xi. \quad (20)$$

Относительно же жесткостной функции τ_{zy} известно, что она антисимметрична по ширине сечения [3], поэтому ее среднее по ширине сечения равняется нулю:

$$\langle \tau_{zy} \rangle = 0. \quad (21)$$

Из формул (48, [1]) для прямоугольного сечения следуют следующие выражения:

$$U_x = \frac{v}{2} \left(-y^2 + x^2 + \frac{b^3 - 1}{12} \right), \quad \langle U_x \rangle = \frac{v}{2} \left(x^2 - \frac{1}{12} \right). \quad (22)$$

Усредним первое равенство (39, [1]) и подставим в него второе выражение (22), проинтегрируем его по переменной x и выразим усредненную жесткостную функцию $\langle U_z \rangle$:

$$\langle U_z \rangle = \int_{-0.5}^{x} \left(\frac{\langle (\tau_{zx}) \rangle}{(\mu_{zx})_i} - \langle U_x \rangle \right) d\xi + C_1. \quad (23)$$

Согласно формулам (21, [1]) и равенству (23) для коэффициента K_ϕ справедливо следующее выражение (величина K_ϕ в силу симметрии сечения не зависит от константы C_1):

$$K_\phi = -\frac{1}{J} \int_{-0.5}^{0.5} x \langle (U_z) \rangle dx. \quad (24)$$

Усредним уравнение (40, [1]) при $\alpha = x$ и воспользуемся условиями (42, [1]) на границе сечения:

$$\frac{d \langle \tau_{xx}^* \rangle}{dx} + \langle \tau_{zx} \rangle = 0. \quad (25)$$

Будем считать, что нагрузка равномерно распределена по верхней грани поверхности стержня:

$$f_x^q(\Gamma) = \frac{1}{b}.$$

С учетом этого усредним равенство (41, [1]) по верхней грани

$$\langle \tau_{xx}^* \rangle \Big|_{x=-0.5} = -D_1/b. \quad (26)$$

Проинтегрируем равенство (34, [1]) по переменной x и воспользуемся условием на константу интегрирования (35, [1]):

$$\langle \tau_{xx}^* \rangle = -D_1/b - \int_{-0.5}^{x} \langle \tau_{zx} \rangle d\xi. \quad (27)$$

В силу своей антисимметричности средние значения следующих функций равны нулю [3]:

$$\langle (\tau_{yy})_i^* \rangle = \langle (\tau_{xy})_i^* \rangle = 0. \quad (28)$$

Усредним по ширине сечения выражение (44, [1]) и используем первое равенство (76)

$$\langle \tau_{zz}^* \rangle_i = (E_z)_i \langle U_z \rangle + v \langle \tau_{xx}^* \rangle. \quad (29)$$

Константа C_1 , входящая в выражение (23), находится из условия выполнения следующего равенства [3]:

$$\int_{-0.5}^{0.5} \langle \tau_{zz}^* \rangle dx = 0. \quad (30)$$

Полученные равенства для средних величин $\langle \tau_{\alpha\beta} \rangle$, $\langle \tau_{\alpha\beta}^* \rangle$ справедливы для любого прямоугольного сечения, но в случае, когда мы рассматриваем узкое прямоугольное сечение, средние значения величин будут мало отличаться от самих жесткостных функций

$$\tau_{\alpha\beta} = \langle \tau_{\alpha\beta} \rangle, \quad \tau_{\alpha\beta}^* = \langle \tau_{\alpha\beta}^* \rangle. \quad (31)$$

Таким образом, все жесткостные функции, необходимые для нахождения коэффициентов и правой части уравнения (4) и компонент напряжений по формулам (10), (11), определены и могут быть посчитаны по формулам (21), [1]), (9), (20), (21), (27)–(31).

В частном случае однородной балки (материал всех трех слоев совпадает) жесткостные функции и коэффициенты в соответствии с равенствами (20), (23), (27) могут быть посчитаны по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \langle \tau_{zx} \rangle &= 0,5E_z(x^2 - 0,25), \quad \langle U_z \rangle = (2 + v) \frac{x^3}{6} - \left(\frac{1}{4} + \frac{5}{24}v \right)x + \frac{v}{24}, \\ \langle \tau_{xx} \rangle &= -\frac{E}{2} \left(\frac{x^3}{3} - \frac{x}{4} + \frac{1}{12} \right), \quad \langle \tau_{zz}^* \rangle = E_z \left(\frac{x^3}{3} - \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{12}v \right)x \right), \\ D_1 &= \frac{bE_z}{12}, \quad \zeta = K_\phi - 0,1v, \quad K_\phi = \frac{1}{6}(1,2 + 1,1v). \end{aligned} \quad (32)$$

Подставим полученный результат в первую формулу (2) и вторую формулу (5), получим формулы для вычисления коэффициентов α и β для однородной балки прямоугольного сечения:

$$\alpha = \frac{1,2 + 1,1v}{1 + v}, \quad \beta = \frac{1,2 + 0,5v}{1 + v}. \quad (33)$$

Из первой строки таблицы следует, что $\alpha = 1,18$, $\beta = 1,1$ при $v = 0,25$. Для такой балки сам Тимошенко из некоторых эвристических соображений приводит значение коэффициента формы — $\alpha = 1,5$, не зависящее от коэффициента Пуассона v [4]. Разница в значениях коэффициента α составляет 27 %. Разница между коэффициентами α и β для однородной балки прямоугольного сечения не может принимать слишком большое значение, так как в соответствии с формулами (33) она пропорциональна коэффициенту Пуассона.

Характеристики слоев	α	β	K_ϕ	ζ	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4
$E_n = E_c = 1$	1,18	1,06	0,25	0,22	$0,38 \varepsilon^2$	$0,75 \varepsilon^2$	$1,76 \varepsilon^2$	$2,11 \varepsilon^2$
$E_n = 10, E_c = 1, h = 0,05, H = 0,9$	2,05	1,90	0,77	0,71	$1,16 \varepsilon^2$	$2,31 \varepsilon^2$	$5,68 \varepsilon^2$	$6,82 \varepsilon^2$
$E_n = 10, E_c = 1, h = 0,1, H = 0,8$	3,00	2,77	1,20	1,11	$1,80 \varepsilon^2$	$3,60 \varepsilon^2$	$8,88 \varepsilon^2$	$10,66 \varepsilon^2$

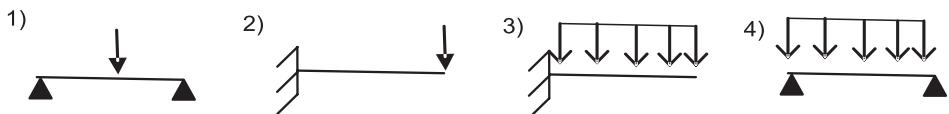


Рис. 2. Шарнирно-оперты и консольные балки под действием сосредоточенной и распределенной нагрузок

Для четырех случаев опирания и нагружения балки сосредоточенной и распределенной нагрузками (рис. 2) рассмотрим величину относительного превышения максимальных прогибов балки, вычисляемых по ГН-теории, к прогибам, вычисляемым по теории Эйлера–Бернулли:

$$\Delta_i = (u_0 - u_s)/u_s, \quad (34)$$

где i — номер балки (см. рис. 2). Решая для этих балок уравнение изгиба (4) с краевыми условиями, задаваемыми с помощью формул (7), (8), и используя уравнение изгиба и соответствующие формулы теории Эйлера–Бернулли (14), и подставляя найденные решения в равенство (34), получим следующие выражения:

$$\Delta_1 = 1,5K_\phi\varepsilon^2, \quad \Delta_2 = 3K_\phi\varepsilon^2, \quad \Delta_3 = 8\zeta\varepsilon^2, \quad \Delta_4 = 9,6\zeta\varepsilon^2. \quad (35)$$

В таблице приведены значения констант $\alpha, \beta, K_\phi, \zeta$ при $v = 0,25$ для трехслойной балки (см. рис. 1, б) и соответствующие им Δ_i , вычисляемые по формулам (35). Из таблицы следует, что наибольшие значения относительного превышения прогиба по ГН-теории над прогибом по эйлеровой теории из рассмотренных случаев имеет место для 4-й балки (см. рис. 2). Даже для достаточно длинных балок, когда параметр ε равен 0,1, величина Δ_4 превышает 10 % для балки с характеристиками слоев из третьей строки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Горынин, Г.Л. ГН-теория расчета композитной балки при изгибе. 1. Общая теория [Текст] / Г.Л. Горынин, Ю.В. Немировский // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 6. — С. 3–12.
- Gorynin, G.L. Deformation of laminated anisotropic bars in the three-dimensional statement 2. Effect of edge boundary layers on the stress-strain properties of the composite [Текст] / G.L. Gorynin, Yu.V. Nemirovsky // Mechanics of composite materials. — 2010. — Vol. 46, N 1. — P. 130–143.
- Горынин, Г.Л. Пространственные задачи изгиба и кручения слоистых конструкций. Метод асимптотического расщепления [Текст] / Г.Л. Горынин, Ю.В. Немировский. — Новосибирск : Наука, 2004. — 408 с.
- Тимошенко, С. Механика материалов [Текст] / С. Тимошенко, Дж. Гере. — М. : Лань, 2002. — 670 с.

ГОРЫНИН Глеб Леонидович, д-р физ.-мат. наук, доц.

Сургутский государственный университет

НЕМИРОВСКИЙ Юрий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, проф.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Получено 06.06.12

Gorynin Gleb Leonidovich, doctor of physical and mathematical sciences, assistant professor, Surgut State University, Russia

Nemirovsky Yury Vladimirovich, doctor of physical and mathematical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

GN-THEORY CALCULATION OF THE COMPOSITE BEAM AT THE BEND 2. THE DIMENSIONAL THEORY AND EXAMPLE

In work [1] the theory of a bend of composite beams of any symmetric section in the dimensionless form is constructed. Given article is continuation of this work. The dimensional theory is constructed. Euler-Bernulli theory for composite beams is constructed. Comparison with Timoshenko's specified theory is made.

Key words: composite, layered beam, edge effect.

REFERENCES

1. Gorynin, G.L. The GN-theory of calculation of a composite beam at a bend. 1. The general theory [Text] / G.L. Gorynin, Yu.V. Nemirovsky // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 6. — P. 3–12.
 2. Gorynin, G.L. Deformation of laminated anisotropic bars in the three-dimensional statement 2. Effect of edge boundary layers on the stress-strain properties of the composite [Text] / G.L. Gorynin, Yu.V. Nemirovsky // Mechanics of composite materials. — 2010. — Vol. 46, N 1. — P. 130–143.
 3. Gorynin, G.L. Spatial of a problem of a bend and torsion of layered designs. A method asymptotic splittings [Text] / G.L. Gorynin, Yu.V. Nemirovsky. — Novosibirsk : Nauka, 2004. — 408 p.
 4. Timoshenko, S. Mechanics of materials [Text] / S. Timoshenko, J. Gere. — M. : Lun, 2002. — 670 p.
-

УДК 624.042:534.014

А.В. ДУКАРТ, ТХАНЬ БИНЬ ФАМ

**ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ
УДАРНОГО ГАСИТЕЛЯ КОЛЕБАНИЙ
ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ ВИБРОЗАЩИТЫ ГИБКИХ ЭЛЕМЕНТОВ,
ОПИРАЮЩИХСЯ НА МАССИВНУЮ КОНСТРУКЦИЮ
ПРИ ДЕЙСТВИИ НА НЕЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ**

Рассматриваются стационарные колебания неавтономной механической трехмассовой диссипативной системы с последовательным соединением звеньев, вызванные приложенными к одной из масс (поддерживающей конструкции) периодическими мгновенными импульсами и сопровождающиеся соударениями двух других масс (защищаемого элемента и гасителя). Получено решение для случая одноударного движения системы, которое предполагается устойчивым и используется для выбора параметров гасителя и оценки его эффективности из условия минимума наибольших относительных колебаний защищаемого элемента.

Ключевые слова: защищаемый элемент, ударный гаситель, поддерживающая конструкция, периодические мгновенные импульсы, установившиеся колебания, вязкое трение, настройка гасителя, коэффициент восстановления.

В инженерной практике во многих случаях возникает необходимость локальной виброзащиты отдельных ответственных гибких элементов конструкций, сооружений и оборудования, опирающихся на значительно более массивную конструкцию, колебания которой могут быть вызваны сейсмическими, взрывными, ударными, волновыми и иными нестационарными воздействиями. В работах [1–3] исследуется поведение таких элементов с присоединенным динамическим или ударным гасителем колебаний при действии на поддерживающую конструкцию одиночного кратковременного, в частности мгновенного, импульса в предположении, что расчетные схемы защищаемого элемента, поддерживающей конструкции и гасителя моделируются одномассовыми системами. При этом в [1, 3] в основу решений положено допущение о незначительном влиянии защищаемого элемента на свободные колебания поддерживающей конструкции, которым вследствие большого различия их масс можно пренебречь, что позволяет вместо исходной системы ограничиться изучением колебаний двухмассовой системы «защищаемый элемент — гаситель» при заданном движении основания защищаемого элемента по закону затухающей синусоиды. Аналогичная задача, но без указанного упрощающего допущения, рассматривалась в статье [2]. В перечисленных работах показано, что гасители значительно снижают уровень и существенно увеличивают темп затухания колебаний защищаемого элемента.

В настоящей работе рассматриваются некоторые вопросы локальной виброзащиты с помощью ударного гасителя гибкого элемента, расположенного на массивной поддерживающей конструкции, колебания

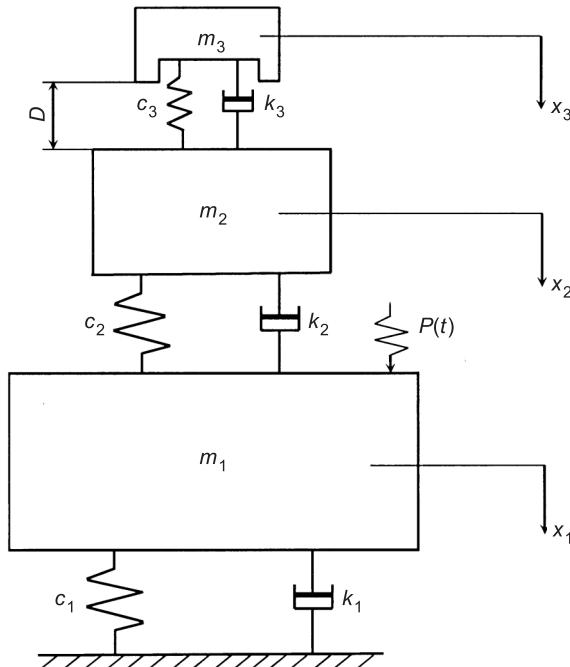


Рис. 1. Расчетная схема защищаемого элемента, оборудованного ударным гасителем и установленного на массивной поддерживающей конструкции

которой вызваны действием периодических мгновенных импульсов $P(t) = P_0 \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT)$, где P_0 — величина импульса; $\delta(t)$ — дельта-функция Дирака; T — период и $\theta = 2\pi/T$ — частота приложения импульсов.

Подобные задачи возникают, например, при виброзашите прецизионного оборудования и точных измерительных приборов, установленных на междуетажных перекрытиях промышленных цехов при периодических нагрузках, создаваемых расположенными на перекрытиях различными машинами ударного действия¹.

Расчетная схема рассматриваемой системы представляет собой трехмассовую систему с последовательным соединением звеньев (рис. 1). Неупругое сопротивление в звеньях системы учитывается в соответствии с гипотезой линейно-вязкого трения Фойгта, причем принимается, что исходная система обладает непропорциональным демпфированием. Предполагается, что при соударениях масс защищаемого элемента и гасителя выполняются обычные гипотезы стереомеханической теории удара², что позволяет считать ударные импульсы мгновенными, а периодическую последовательность импульсов, вызванных соударениями масс, представить в виде $S(t) = S_* \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT - t_*)$, где S_* — величина и t_* — момент возникновения ударного импульса.

Будем считать, что совершаемые системой в промежутках времени между последовательно действующими внешними P_0 и внутренними S_*

¹ Инструкция по расчету перекрытий на импульсивные нагрузки. М.: Стройиздат, 1966. 134 с.

² Гольдсмит В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел. М.: Стройиздат, 1965. 449 с.

импульсами свободные колебания описываются линейными дифференциальными уравнениями:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + k_1 \dot{x}_1 + c_1 x_1 + k_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c_2 (x_1 - x_2) &= 0; \\ m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_2 (x_2 - x_1) + m_3 \ddot{x}_3 &= 0; \\ m_3 \ddot{x}_3 + k_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + c_3 (x_3 - x_2) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где m_j , c_j , k_j , x_j — соответственно масса, квазиупругий коэффициент, коэффициент вязкого трения и абсолютная координата поддерживающей конструкции ($j=1$), защищаемого элемента ($j=2$) и гасителя ($j=3$).

Рассмотрим стационарные колебания системы с одним соударением между массами m_2 и m_3 за период T внешнего возмущения $P(t)$. В этом случае движение гасителя относительно защищаемого элемента ограничено начальным зазором D

$$\bar{x}(t) = x_3(t) - x_2(t) \leq D, \quad (2)$$

причем соударения масс происходят, когда в (2) выполняется равенство и относительная скорость масс $\dot{\bar{x}}(t)$, соответствующая моменту соударения t_* , положительна. Установившееся движение исходной системы с ударным гасителем в интервале времени $0 \leq t \leq T$ рассматриваем как колебания безударной системы, к которой наряду с заданным возмущением $P(t)$ к массам защищаемого элемента и гасителя приложены внутренние импульсы одностороннего направления $S(t)$, т.е. полное движение масс системы определяется суммой

$$x_j(t) = x_j^p(t) + x_j^s(t). \quad (3)$$

Здесь $x_j^p(t)$ — колебания системы, отвечающие внешнему импульсивному воздействию $P(t)$ при отсутствии ограничения (2); $x_j^s(t)$ — колебания масс, вызванные внутренней импульсивной нагрузкой $S(t)$. Отметим, что такой подход широко используется для построения периодических режимов движения в системе с ударным гасителем колебаний в предположении, что она обладает как пропорциональным³,⁴, так и непропорциональным [4] демпфированием.

Для определения составляющих полного движения (3) воспользуемся точным способом отыскания периодических режимов движения многомассовых систем, колебания которых сопровождаются соударениями некоторых масс, предложенным в статье⁵ и получившим развитие для решения ряда задач теории виброзащитных систем в монографии [4] и других работах автора, например в [2]. Используя полученные в указанных работах решения, запишем стационарные колебания рассматриваемой системы, определяемые заданным возмущением $P(t)$ и ударными импульсами $S(t)$ и удовлетворяющие уравнениям (1) и условиям периодичности движения масс системы, в вещественной форме

³ Дукарт А.В. Исследование эффективности ударного гасителя колебаний при периодическом импульсивном воздействии // Динамика и прочность тяжелых машин. Днепропетровск: ДГУ, 1985. Вып. 9. С. 26–31.

⁴ Зевин А.А. Периодические режимы в системе с ударным гасителем // Механика машин. М.: Наука, 1969. Вып. 17–18. С. 79–85.

⁵ Дукарт А.В. Способ построения периодических режимов движения многомассовых виброударных систем и его приложение к расчету ударного гасителя колебаний с демпфированием // Проблемы машиностроения и надежности машин. Машиноведение. 1993. № 3. С. 16–22.

$$x_j^p(t) = P_0 \sum_{v=1}^3 \frac{e^{-0.5h_v t}}{\left(\operatorname{ch} 0.5h_v T - \cos \omega_v T\right)} \{ [u_{jv}^p(e^{0.5h_v T} - \cos \omega_v T) - v_{jv}^p \sin \omega_v T] \times \\ \times \cos \omega_v t - [u_{jv}^p \sin \omega_v T + v_{jv}^p(e^{0.5h_v T} - \cos \omega_v T)] \sin \omega_v t \}; \quad (4)$$

$$x_j^s(t) = S_* \sum_{v=1}^3 \frac{e^{-0.5h_v(t-t_*)}}{\left(\operatorname{ch} 0.5h_v T - \cos \omega_v T\right)} \{ [u_{jv}^s(e^{0.5h_v T} - \cos \omega_v T) - v_{jv}^s \sin \omega_v T] \times \\ \times \cos \omega_v(t-t_*) - [u_{jv}^s \sin \omega_v T + v_{jv}^s(e^{0.5h_v T} - \cos \omega_v T)] \sin \omega_v(t-t_*) \}, \quad (5)$$

где

$$u_{jv}^p = \beta_{2v-1}^{(j)} \alpha_{2v-1}^0 - \beta_{2v}^{(j)} \alpha_{2v}^0; \quad v_{jv}^p = \beta_{2v}^{(j)} \alpha_{2v-1}^0 + \beta_{2v-1}^{(j)} \alpha_{2v}^0; \quad (6)$$

$$u_{jv}^s = \beta_{2v-1}^{(j)} \alpha_{2v-1}^* - \beta_{2v}^{(j)} \alpha_{2v}^*; \quad v_{jv}^s = \beta_{2v}^{(j)} \alpha_{2v-1}^* + \beta_{2v-1}^{(j)} \alpha_{2v}^*. \quad (7)$$

Отметим, что функция (4) описывает колебания масс системы в промежутке времени $0 \leq t \leq T$, а функция (5) — в интервале $t_* \leq t \leq t_* + T$. При $-T + t_* \leq t \leq t_*$ следует в (5) заменить t на $t + T$. Для вычисления входящих в (4)–(7) частот $\omega_v > 0$, коэффициентов демпфирования $h_v > 0$ и коэффициентов распределения амплитуд $\beta_{2v-1}^{(j)}, \beta_{2v}^{(j)}$ свободных колебаний исходной системы можно воспользоваться решениями, приведенными, в частности, в статье [2].

Постоянные интегрирования $\alpha_{2v-1}^0, \alpha_{2v}^0$ соответствуют свободным колебаниям рассматриваемой системы, вызванным приложенным в начальный момент времени ($t=0$) к поддерживающей конструкции (массе m_1) одиночного импульса P_0 . Начальные условия движения масс, отвечающие такому возмущению:

$$\begin{aligned} x_1^p(0) &= 0; \quad x_2^p(0) = 0; \quad x_3^p(0) = 0; \\ \dot{x}_1^p(0) &= P_0 / m_1; \quad \dot{x}_2^p(0) = 0; \quad \dot{x}_3^p(0) = 0 \end{aligned}$$

приводят к системе уравнений

$$\bar{B} \vec{\alpha}^0 = 0.5 \vec{W}_0, \quad (8)$$

где \bar{B} — квадратная 6×6 -матрица, элементы которой вычисляются по формулам статьи [2]; $\vec{\alpha}^0$ и \vec{W}_0 — матрицы-столбцы, элементами которых являются соответственно постоянные α_l^0 ($l = \overline{1,6}$) и начальные отклонения $x_j^p(0)$ и взятые с обратным знаком начальные скорости $\dot{x}_j^p(0)$ масс системы

$$\begin{aligned} \vec{\alpha}^0 &= [\alpha_1^0, \alpha_2^0, \alpha_3^0, \alpha_4^0, \alpha_5^0, \alpha_6^0]^T; \\ \vec{W}_0 &= [0, 0, 0, -P_0 / m_1, 0, 0]^T; \end{aligned}$$

индекс « T » означает операцию транспонирования матриц.

Для определения постоянных $\alpha_{2v-1}^*, \alpha_{2v}^*$, соответствующих свободным колебаниям системы при одновременном приложении к массам m_2 и m_3 в момент времени t_* мгновенных импульсов S_* противоположного направления, служат начальные условия движения системы:

$$\begin{aligned} x_1^s(t_*) &= 0; \quad x_2^s(t_*) = 0; \quad x_3^s(t_*) = 0; \\ \dot{x}_1^s(t_*) &= 0; \quad \dot{x}_2^s(t_*) = S_* / m_2; \quad \dot{x}_3^s(t_0) = -S_* / m_3. \end{aligned}$$

Они приводят к уравнению вида (8), в котором следует заменить векторы $\vec{\alpha}^0$ и \vec{W}_0 на матрицы-столбцы $\vec{\alpha}^*$ и \vec{W}_* соответственно:

$$\begin{aligned}\vec{\alpha}^* &= [\alpha_1^*, \alpha_2^*, \alpha_3^*, \alpha_4^*, \alpha_5^*, \alpha_6^*]^T; \\ \vec{W}_* &= [0, 0, 0, 0, -S_*/m_2, S_*/m_3]^T.\end{aligned}$$

Движение рассматриваемой системы можно считать найденным, если известны величины S_* и t_* . Для их определения необходимо с помощью (3)–(5) выразить относительные колебания масс m_3 и m_2 и далее воспользоваться геометрическим условием соударения (2) и теоремой импульсов². Они дают трансцендентное уравнение относительно момента соударения масс в виде

$$x^p(t_*) + N\dot{x}^p(t_*) = D \quad (9)$$

и формулу для вычисления ударного импульса

$$S_* = \frac{m_2 m_3 (R+1) \dot{x}^p(t_*)}{(m_2 + m_3)[1 + (R+1)\Phi]}. \quad (10)$$

В (9), (10) R — коэффициент восстановления при ударе², $0 < R < 1$;

$$N = -\frac{m_2 m_3 (R+1)}{(m_2 + m_3)[1 + (R+1)\Phi]} \sum_{v=1}^3 \frac{1}{(\operatorname{ch} 0,5 h_v T - \cos \omega_v T)} \times$$

$$\times [(v_{3v}^s - v_{2v}^s) \sin \omega_v T + (u_{3v}^s - u_{2v}^s)(\cos \omega_v T - e^{0,5 h_v T})];$$

$$\Phi = -\frac{m_2 m_3}{(m_2 + m_3)} \sum_{v=1}^3 \frac{1}{(\operatorname{ch} 0,5 h_v T - \cos \omega_v T)} \{[0,5 h_v \sin \omega_v T -$$

$$-\omega_v (\cos \omega_v T - e^{-0,5 h_v T})](v_{3v}^s - v_{2v}^s) - [0,5 h_v (\cos \omega_v T - e^{-0,5 h_v T}) +$$

$$+\omega_v \sin \omega_v T](u_{3v}^s - u_{2v}^s)\}.$$

Корни уравнения (9) могут быть найдены различными численными методами⁶, при этом искомый корень t_* должен удовлетворять условию положительности импульса S_* , определяемого по формуле (10). Учитывая⁵ [4], что $\Phi \geq -0,5$ из (10) следует условие $\dot{x}^p(t_*) > 0$. Отметим, что физический смысл имеют только те решения, которые в промежутке времени $0 \leq t \leq T$ удовлетворяют условию (2). Кроме того, предполагается, что для принятых значений параметров рассматриваемой системы искомый режим движения с одним соударением между массами m_3 и m_2 за период внешнего возбуждения может быть реализован и является устойчивым.

Полученные соотношения позволяют полностью описать заданное периодическое движение системы и, таким образом, решать задачу выбора параметров ударного гасителя колебаний одностороннего действия. Для ее численной реализации введем безразмерные переменные:

$$\begin{aligned}\mu_j &= m_j / m_1; s_j = \omega_{0j} / \omega_{01}; \delta_{0j} = h_{0j} / \omega_{01}; y_j(\tau) = x_j(t) / x_0; \\ y(\tau) &= y_2(\tau) - y_1(\tau); \tau = \theta t; \lambda = \theta / \omega_{01}; d = D / x_0,\end{aligned}$$

где $h_{0j} = k_j / (2m_j)$; $\omega_{0j} = \sqrt{c_j / m_j}$; $x_0 = P_0 / (m_1 \omega_{01})$.

⁶ Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. 832 с.

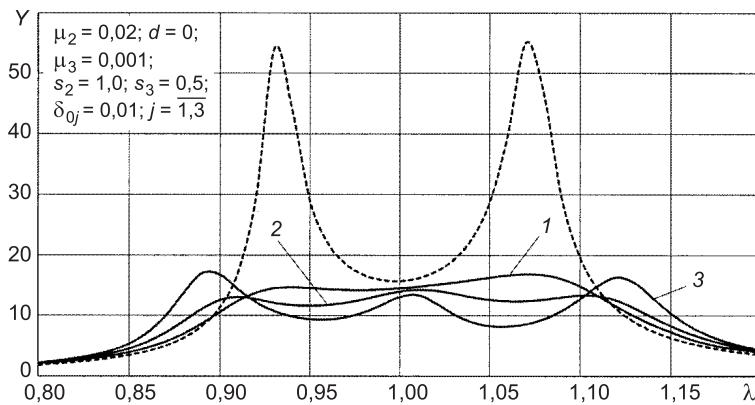


Рис. 2. ИЧХ относительных колебаний главной массы для различных значений коэффициента восстановления

1 — $R = 0,4$; 2 — $R = 0,6$; 3 — $R = 0,8$

Будем далее считать, что частота приложения импульсов является нестабильной, т.е. может принимать произвольные значения, в том числе совпадать с частотами свободных колебаний системы. Рассмотрим колебания системы только в режиме основного резонанса. В этом случае⁷ можно ограничиться исследованием поведения защищаемого элемента в диапазоне частот $0,8 \leq \lambda \leq 1,2$. За критерий качества виброзащиты примем наибольшие отклонения главной массы $Y = \max |y(\tau)|$ относительно поддерживающей конструкции в указанном частотном интервале. Таким образом, решение задачи выбора параметров гасителя в данном случае связано с минимизацией максимальных ординат импульсно-частотных характеристик (ИЧХ) относительных колебаний защищаемого элемента.

На рис. 2 приведены графики функции $Y(\lambda)$ для некоторых значений коэффициента восстановления при ударе при фиксированных значениях других величин (для сравнения там же показана ИЧХ относительных колебаний главной массы при отсутствии гасителя). Они показывают, что в зависимости от величины коэффициента восстановления ИЧХ относительных колебаний защищаемого элемента может иметь до трех максимумов. Оптимальные значения настройки s_3 и коэффициента вязкого трения δ_{03} гасителя при этом обычно определяются из условия примерного равенства всех максимумов резонансной кривой $Y(\lambda)$ в рассматриваемом частотном диапазоне. В тех случаях, когда это условие не реализовывается, оптимальные значения параметров гасителя определяются из условия равенства только двух максимумов функции $Y(\lambda)$, расположенных слева и справа от резонансной частоты $\theta = \omega_{01}$, либо из условия минимума наибольших относительных отклонений защищаемой конструкции в окрестности частоты ω_{01} при наличии у резонансной кривой одного максимума.

Некоторые результаты оптимизации параметров ударного гасителя приведены в таблице, а характерные резонансные кривые колебаний главной массы — на рис. 3; они соответствуют $\mu_2 = 0,02$; $\mu_3/\mu_2 = 0,05$; $s_2 = 1$; $\delta_{02} = 0,025$; $d = 0$. Отметим, что значения максимальных ординат

⁷ Рекомендации по проектированию гасителей колебаний для защиты зданий и сооружений, подверженных горизонтальным динамическим воздействиям от технологического оборудования и ветра. М.: Стройиздат, 1978. 68 с.

Результаты оптимизации параметров УГК при различных значениях коэффициента демпфирования поддерживающей конструкции

δ_{01}	R	$S_3, \text{опт}$	δ_{03}	Y	K_Γ
0,01	0,4	0,4969	0	16,73	3,36
	0,5	0,5000	0	14,56	3,87
	0,6	0,5025	0	14,16	3,98
	0,7	0,4986	0,013	13,90	4,05
	0,8	0,4937	0,038	13,88	4,06
	0,9	0,4903	0,06	13,89	4,06
0,025	0,4	0,5390	0	14,19	2,35
	0,5	0,5060	0	11,58	2,88
	0,6	0,5005	0,015	11,48	2,90
	0,7	0,4955	0,044	11,66	2,86
	0,8	0,4928	0,07	11,91	2,80
	0,9	0,4908	0,087	11,97	2,78
0,05	0,4	0,5210	0	10,12	2,02
	0,5	0,5066	0	9,25	2,21
	0,6	0,5005	0,02	9,30	2,20
	0,7	0,4957	0,039	9,40	2,17
	0,8	0,4929	0,049	9,62	2,12
	0,9	0,4909	0,052	10,21	2,00

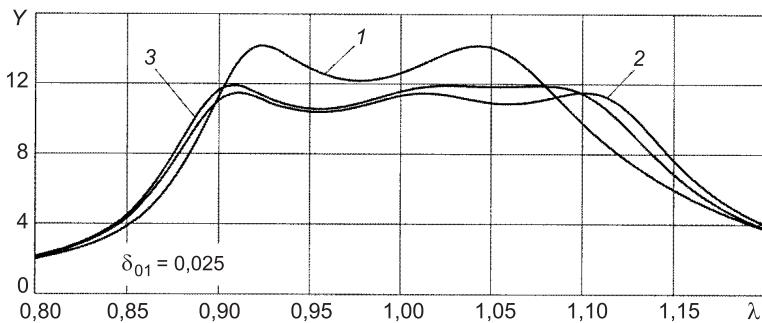


Рис. 3. ИЧХ относительных колебаний главной массы при оптимальных параметрах ударного гасителя

1 — $R = 0,4$; $s_3 = 0,5390$; $\delta_{03} = 0$; 2 — $R = 0,6$; $s_3 = 0,5005$; $\delta_{03} = 0,015$; 3 — $R = 0,8$; $s_3 = 0,4928$; $\delta_{03} = 0,07$

ИЧХ, приведенных в таблице, соответствуют оптимальному значению коэффициента трения в звене гасителя (это не относится к тем случаям, когда введение демпфирования ухудшает работу гасителя; в этих случаях принимается $\delta_{03} = 0$). При значениях δ_{03} , вышеуказанных в таблице, ординаты ИЧХ относительных колебаний защищаемого элемента увеличиваются.

Эффективность виброзащиты обычно^{1, 3} [4] оценивается коэффициентом гашения колебаний K_Γ , определяемым как отношение максимумов резонансных кривых $Y(\lambda)$ без гасителя к соответствующей величине при наличии оптимально настроенного гасителя. Как следует из таблицы, эффективность УГК при рассматриваемом периодическом импульсивном возмущении достаточно высока, особенно при малых значениях коэффициента демпфирования в звене поддерживающей конструкции, причем определенному значению коэффициента вязкого трения последней соответствует свое оптимальное значение коэффициента восстановления при ударе. Так, при $\delta_{01} = 0,025$ таким значением является $R \approx 0,6$, а при

$\delta_{01} = 0,05$ оно находится в интервале $0,5 < R < 0,6$ (см. таблицу). Этим объясняется характер зависимости коэффициента гашения от коэффициента восстановления R при его малых значениях — она связана с тем, что ИЧХ относительных колебаний защищаемого элемента переходит из функции с одним или двумя максимумами в функцию $Y(\lambda)$ с тремя резонансными пиками в частотном диапазоне основного импульсного резонанса.

В заключение отметим, что полученное в данной работе решение может быть использовано и в том случае, когда демпфирование в звеньях рассматриваемой системы учитывается другими способами^{8, 9}, в частности в соответствии с гипотезами частотно-независимого трения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дукарт, А.В. Нестационарные колебания системы с ударным гасителем при кинематическом возбуждении [Текст] / А.В. Дукарт // Техническая механика / Ин-т техн. механики НАН Украины. — 1999. — № 2. — С. 76–84.
2. Дукарт, А.В. О переходных режимах колебаний защищаемого объекта с гасителем, расположенного на поддерживающей конструкции при действии на нее одиночного импульса [Текст] / А.В. Дукарт, Вьет Нгок Фам, Тхань Бинь Фам // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 5. — С. 117–126.
3. Коренев, Б.Г. Колебания системы с линейным динамическим гасителем при импульсивном воздействии на поддерживающую конструкцию [Текст] / Б.Г. Коренев, Г.М. Фишман // Строительная механика и расчет сооружений. — 1977. — № 6. — С. 43–46.
4. Дукарт, А.В. Задачи теории ударных гасителей колебаний [Текст] / А.В. Дукарт. — М.: АСВ, 2006. — 208 с.

*ДУКАРТ Адам Вилебальдович, д-р техн. наук, проф.
Московский государственный строительный университет
ФАМ Тхань Бинь, асп.
Московский государственный строительный университет*

Получено 18.05.12

Dukart Adam Vilebaldovich, doctor of technical sciences, professor, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Pham Thanh Binh (Viet Nam), post-graduate student, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

OPTIMUM PARAMETERS AND EFFICIENCY OF IMPACT ABSORBER FOR LOCAL DAMPING OF FLEXIBLE ELEMENTS, RELIED ON MASSVINUYU STRUCTURES, UNDER ACTION OF REPETITIVE IMPULSES

The stationary vibrations of a non-autonomous mechanical dissipative system with three successively connected masses (the supporting structure, protected element and absorber) under the action of periodic instantaneous impulses, acting on the structure, are examined. Periodic motion with one impact between the protected element and absorber is found and the efficiency of the absorber and its optimum parameters are determined from the condition of a minimax relative amplitudes of the protected element.

⁸ Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. М.: Стройиздат, 1960. 131 с.

⁹ Цейтлин А.И. Линейная модель идеального частотно-независимого внутреннего трения // Строительная механика и расчет сооружений. 1977. № 2. С. 28–33.

Key words: protected element, impact absorber, supporting structure, periodic instantaneous impulses, stationary vibrations, viscous friction, tuning of absorber, restitution coefficient.

REFERENCES

1. D u k a r t, A.V. Transient vibrations of a system with an impact absorber at a kinematics excitation [Text] / A.V. Dukart // Technical mechanics / ITM NAS of Ukraine. — 1999. — N 2. — P. 76–84.
 2. D u k a r t, A.V. On transient vibrations of a protected object with an absorber, arranged on a supporting structure, under action of an impulse [Text] / A.V. Dukart, Viet Ngoc Pham, Thanh Binh Pham // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 5. — P. 117–126.
 3. K o r e n e v, B.G. Oscillations of a systems with a linear dynamic absorber at impulsive excitation of a supporting construction [Text] / B.G. Korenev, G.M. Fishman // Structural mechanics and calculation of buildings. — 1977. — N 6. — P. 43–46.
 4. D u k a r t, A.V. Problems of theory impact vibration damper [Text] / A.V. Dukart. — M.: ASV, 2006. — 208 p.
-

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.31:666.964.3.002.3

М.А. ВЫСОЦКАЯ, М.Ю. ФЁДОРОВ, Д.А. КУЗНЕЦОВ

АДСОРБЦИОННАЯ И СТРУКТУРИРУЮЩАЯ АКТИВНОСТЬ ПЕРЛИТА КАК НАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА

Работа посвящена особенностям структурообразования органоминерального композита при использовании перлитового минерального порошка, связанного с его высокой адсорбционной активностью и структурирующей способностью по отношению к органическому вяжущему и обусловленного высокоразвитой системой пор и состоянием поверхности.

Ключевые слова: перлитовый наполнитель, структурообразование, адсорбционная активность.

Исследование новых видов минеральных порошков имеет большое теоретическое и практическое значение, так как специфические свойства этих материалов придают новые особенности органоминеральному композиту. В качестве минерального порошка для производства асфальтобетона нашли применение тонкодисперсные отходы различных производств. Значительный вклад в образующийся объем отходов на территории РФ принадлежит пористым дисперсным материалам, причем практически каждый регион располагает одним или несколькими видами такого техногенного сырья.

Использование в составе асфальтобетона пористых минеральных материалов в последнее время представляет значительный интерес. Среди исследователей, занимавшихся пористыми наполнителями, необходимо выделить работы [1, 2], в которых показана возможность использования перлита в составе асфальтобетона, исследования О.А. Борисенко [3], В.С. Прокопца [4]. Очевидна актуальность данного направления исследований в возможности решения задачи получения качественного асфальтобетона. В указанных работах [1–4] установлено положительное влияние пористых дисперсных материалов на свойства дорожного композита. Также использование таких наполнителей способствует повышению тепло-, трещиностойкости и сдвигостойчивости дорожного композита, а также снижению стоимости приготовления асфальтобетонной смеси и уменьшению экологического воздействия на окружающую среду.

Цель данной работы — исследование свойств перлитового наполнителя, его адсорбционной и структурирующей активности, механизма взаимодействия с битумом и обоснование возможности его использования в качестве минерального порошка в составе асфальтобетонных смесей. Интерес к этому сырью объясняется тем, что в 2002 г. в г. Старый Оскол начал функционировать цех по производству всученного перлита, оснащенный вертикальной печью современной конструкции производительностью 140 тыс. м³ в год. При производстве перлитового песка обра-

зуется значительное количество перлитовой пыли с размером частиц менее 0,16 мм, количество которой составляет около 10 % от объема производства. Таким образом, в год образуется около 14 тыс. м³ мелкой фракции, относящейся к вспученным перлитовым порошкам, которые при рациональном подходе могут использоваться в качестве минерального порошка для производства асфальтобетона.

В работе также использовался минеральный порошок из известняка Елецкого месторождения, в качестве контрольного образца, и исследуемый дисперсный перлитовый наполнитель, а также битум марки БНД 60/90 Новокуйбышевского НПЗ. На первом этапе исследований были определены характеристики минерального порошка и асфальтовяжущего вещества (АВВ) на его основе. Из табл. 1 видно, что такие важные показатели минерального порошка из перлита, как битумоемкость, зерновой

Свойства минеральных порошков

Наименование показателя	Минеральный порошок	
	перлит	известняк
	МП-2	МП-1
Зерновой состав, мас. %:		
мельче 1,25 мм	100	100
мельче 0,315 мм	96	96
мельче 0,071 мм	80	85
Показатель битумоемкости, г	78	68
Водостойкость образцов из смеси порошка с битумом, %	0,85	0,91
Пористость, %	39	28
Набухание образцов из смеси порошка с битумом, %	1,67	1,15
Влажность, мас. %	0,48	0,40

состав, а также водостойкость и набухание образцов из смеси наполнителя с битумом соответствуют требованиям стандарта к минеральным порошкам типа МП-2. Более высокая битумоемкость наполнителя из перлита по сравнению с традиционным известняком, по-видимому, является следствием высокой его пористости и удельной поверхности.

Результаты РФА свидетельствуют о наличии в составе перлита минералов аморфного (опала) и кристаллического (тридимита, кристобалита) кремнезема. Это характеризует сырье как кислую породу. Однако взаимодействие минеральных материалов с вяжущим в асфальтобетоне зависит не только от химического и минералогического состава сырья, но и от состояния его поверхности, в частности, наличия адсорбционных центров, которые определяют активность подложки по отношению к вяжущему и влияют на процессы структурообразования.

Установлено, что содержание активных центров на поверхности перлита на 12 % выше, чем известняка, что позволяет предположить высокую реакционную способность такого наполнителя при контакте с вяжущим. Для определения способности наполнителей адсорбировать и удерживать на своей поверхности битум проводили исследования по адсорбции—десорбции битума из бензольных растворов поверхностью наполнителей (рис. 1).

Как видно из рис. 1, более высокой адсорбционной активностью по отношению к битуму обладает перлит. Такая активность наполнителя может быть объяснена высокоразвитой системой пор и большим количеством активных центров на поверхности, способных адсорбировать компоненты битума. Так, при концентрации битума в бензольном растворе

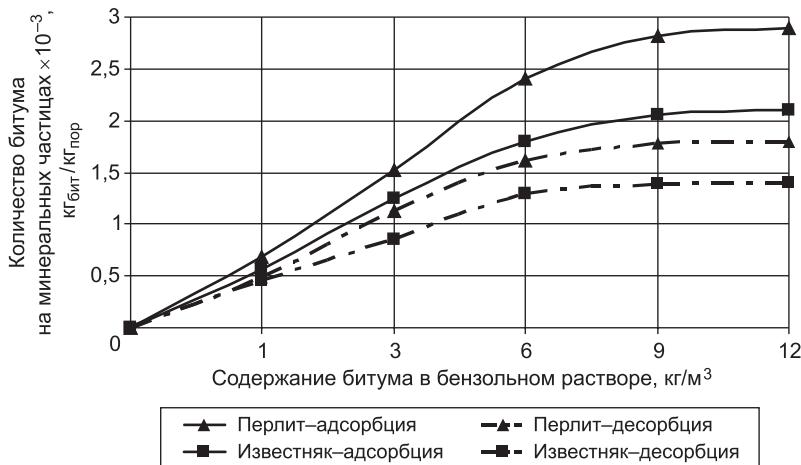


Рис. 1. Показатели адсорбции–десорбции битума на поверхности минеральных порошков

12 $\text{кг}/\text{м}^3$ величина его адсорбции поверхностью перлита составляет $2,9 \times 10^{-3}$ $\text{кг}_{\text{бит}} / \text{кг}_{\text{пор}}$, а поверхностью известняка $2,1 \times 10^{-3}$ $\text{кг}_{\text{бит}} / \text{кг}_{\text{пор}}$. Исследование десорбции битума показало, что часть вяжущего отслаивается с поверхности. Это свидетельствует о том, что предельно насыщенный адсорбционный слой битума на поверхности наполнителей состоит изочно, химически, и обратимо, физически связанного битума. Так, после десорбции на поверхности перлита осталось $1,8 \times 10^{-3}$ $\text{кг}_{\text{бит}} / \text{кг}_{\text{пор}}$, а на поверхности известняка $1,4 \times 10^{-3}$ $\text{кг}_{\text{бит}} / \text{кг}_{\text{пор}}$.

Возможность взаимодействия органического вяжущего с минеральным порошком из перлита, наряду с его высокоразвитой удельной поверхностью, можно объяснить наличием большого количества активных поверхностных центров, которые способны адсорбировать практически все органические соединения, содержащиеся в битуме. Наибольший вклад в это взаимодействие вносят кислотные и основные бренстедовские и кислотные льюисовские центры.

Известно, что основная роль минерального порошка в составе асфальтобетонной смеси состоит в переводе битума из объемного в структурированное состояние. Изучение структурообразующей способности исследуемых минеральных порошков производилось методом конической пластиометрии, основанном на изменении кинетики погружения острого конуса в исследуемый материал при постоянной нагрузке (рис. 2).

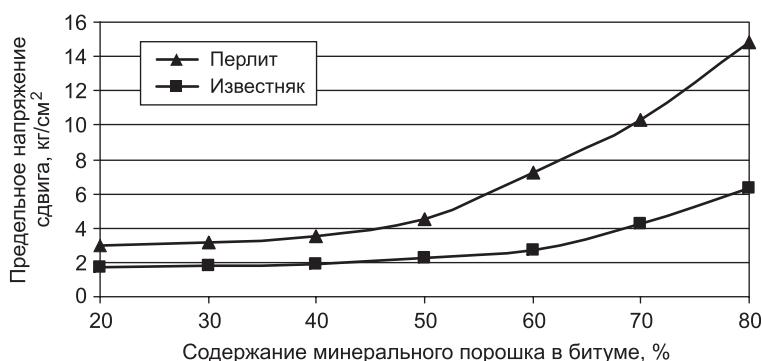


Рис. 2. Зависимость предельного напряжения сдвига от содержания наполнителя в асфальтовяжущем

Из рис. 2 видно, что наиболее активным наполнителем является перлит. Резкое увеличение пластической прочности бинарной системы происходит при концентрации перлита 40–50 %, а известняка — 60 %. При содержании наполнителя в битуме в количестве 80% предельное напряжение сдвига системы «битум — наполнитель» на перлите составило 14,84 кг/см², а на известняке 6,32 кг/см². Известно, что температура асфальтобетона при его работе в покрытии в летнее время может превышать 60 °С. При этом вязкость битума уменьшается, повышается пластичность дорожного композита, происходит ослабление структурных связей в асфальтобетоне с возможным появлением сдвиговых деформаций. Один из путей повышения сдвигостойчивости дорожных покрытий — использование в их составе минеральных порошков с высокой структурирующей битум способностью. Морфология поверхности тонкодисперсных частиц также играет большое значение, так как сколы и микрорешетчатости будут способствовать большему внутреннему трению, а следовательно, и лучшему взаимодействию вяжущего с минеральным порошком. В связи с этим представляло интерес изучение влияния содержания минерального порошка в составе АВБ на температуру его размягчения (рис. 3).

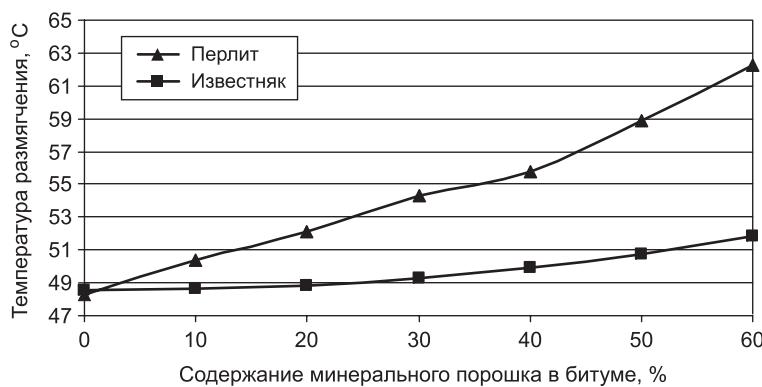


Рис. 3. Зависимость температуры размягчения битума от содержания и вида минерального порошка

Как и ожидалось, исследуемый пористый минеральный порошок оказывает положительное влияние на температуру размягчения асфальтовяжущего вещества. Так, при концентрации перлита в битуме 60 % температура размягчения АВБ составила 62,3 °С, а на наполнителе из известняка — 51,8 °С.

Опираясь на результаты по структурообразующей способности наполнителей, можно предположить, что дорожный композит на основе минерального порошка из перлита при работе в покрытии в летнее время будет обладать большей тепло- и сдвигостойчивостью, что уменьшит вероятность образования деформаций сдвига, проявляющихся в виде волн и наплывов. Для прогнозирования свойств дорожного композита, приготовленного с использованием перлитового минерального порошка, проведены исследования свойств АВБ, являющегося важнейшей структурной составляющей асфальтобетона. Установлено, что битумоемкость исследуемого наполнителя на 14 % выше, чем традиционного. Водостойкость асфальтовяжущего вещества удовлетворяет требованиям ГОСТ, причем этот показатель для исследуемых образцов несколько ниже, чем для контрольных. Интерес представляют также прочностные показатели АВБ,

особенно предел прочности при 50 °С, который значительно повышается при использовании пористого наполнителя вместо известнякового.

Выводы. 1. На границе раздела фаз битума с минеральным порошком из перлита адсорбционные процессы идут более активно, чем с минеральным порошком из известняка. Такое взаимодействие исследуемого тонкодисперсного отхода с битумом позволяет прогнозировать высокое качество дорожного композита на его основе.

2. Выявлено, что высокая адсорбционная активность и структурирующая способность исследуемого пористого минерального порошка по отношению к органическому вяжущему обусловлена высокоразвитой системой микропор и, как следствие, большой удельной поверхностью наполнителя, а также высокой степенью шероховатости и наличием активных центров на поверхности перлитовой пыли.

3. Установлено, что исследуемый минеральный порошок оказывает большее, нежели известняковый наполнитель, структурирующее влияние на органическое вяжущее. Исходя из этого можно предположить, что дорожное покрытие на основе пористого наполнителя из перлита в летнее время будет менее подвержено сдвиговым деформациям. Этому способствует и большая степень шероховатости поверхности образцов асфальтовяжущего вещества на пористом минеральном порошке, так как при приложении нагрузки в асфальтовой системе будет возникать большее внутреннее трение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Гридчин, А.М. Дорожные композиты на основе дисперсного вспученного перлита [Текст] / А.М. Гридчин, А.П. Коротаев, В.В. Ядыкина, Д.А. Кузнецов, М.А. Высоцкая // Строительные материалы. — 2009. — № 5. — С. 42–44.
- Босхолов, К.А. Асфальтобетон с применением активированных кремнеземсодержащих минеральных порошков [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.23.05 «Строительные материалы и изделия» / К.А. Босхолов. — Улан-Удэ, 2007. — 23 с.
- Борисенко, О.А. Битумоминеральные композиции, модифицированные отсевами дробления керамзита для асфальтовых материалов с повышенными термостабильностью и трещиностойкостью [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.23.05 «Строительные материалы и изделия» / О.А. Борисенко. — Ставрополь, 2008. — 23 с.
- Прокопец, В.С. Физико-механические и деформативные свойства асфальтобетонов на пористом заполнителе [Текст] / В.С. Прокопец, В.Д. Галдина, Г.И. Надыкто, Г.А. Подрез // Вестник СибАДИ : Науч. рецензир. журн. — Омск : СибАДИ, 2009. — № 2(12). — С. 39–43.

ВЫСОЦКАЯ Марина Алексеевна, канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ФЕДОРОВ Михаил Юрьевич, аспн.; E-mail: fedorov.mixail@gmail.com

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

КУЗНЕЦОВ Дмитрий Алексеевич, канд. техн. наук

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено после доработки 22.06.12

Vysotskaya Marina Alexeevna, candidate of technical sciences, assistant professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Fedorov Mikhail Yurievich, post-graduate student; E-mail: fedorov.mixail@gmaill.com, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Kuznetsov Dmitry Alexeевич, candidate of technical sciences, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

ADSORPTION AND STRUCTURES ACTIVITY PERLITE AS A FILLER FOR ASPHALT

The work is devoted to the peculiarities of a formation of organomineral com-positive by using perlite mineral powder, related to its high adsorption activity and structuring capacity relative to the organic binder-statistical and the resulting system has a highly developed and the state of the surface.

Key words: perlite filler, nucleation, adsorption activity.

REFERENCES

1. Gridchin, A.M. Road composites based on particulate expanded perlite [Text] / A.M. Gridchin, A.P. Korotayev, V.V. Yadykina, D.A. Kuznetsov, M.A. Vysotskaya // Building Materials. — 2009. — N 5. — P. 42–44.
 2. Boskholov, K.A. Asphalt concrete with the use of activated silica-containing mineral powders [Text] : abstract. thesis. ... candidate of technical sciences : spec. 05.23.05 «Building materials and products» / K.A. Boskholov. — Ulan-Ude, 2007. — 23 p.
 3. Borisenko, O.A. Bituminous composition, modified by cleavage-sevami expanded clay for asphalt materials with high thermal stability and cracking [Text] : abstract. thesis. ... candidate of technical sciences : spec. 05.23.05 «Building materials and products» / O.A. Borisenko. — Stavropol, 2008. — 23 p.
 4. Prokopets, V.S. Physical, mechanical and deformation properties on the porous asphalt filler [Text] / V.S. Prokopets, V.D. Galdina, G.I. Nadykto, G.A. Podrez // Bulletin SibADI: Scientific peer-reviewed journal. — Omsk : SibADI, 2009. — N 2(12). — P. 39–43.
-

УДК 691.618.93

А.Ю. КАНАЕВ, И.А. ХРИСТОФОРОВА, А.И. ХРИСТОФОРОВ

ПЕНОСИЛИКАТ, МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ЖЕЛЕЗООКСИДНЫМИ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ОТХОДАМИ

Рассмотрены современные способы получения пористых строительных теплоизоляционных материалов с применением промышленных отходов. Предложено введение железооксидных отходов в технологический процесс изготовления пеносиликата. На основе методов математического моделирования показано влияние температурного режима изготовления и концентрации отходов на характер изменения таких свойств полученного материала, как плотность, водопоглощение, диаметр пор и коэффициент теплопроводности. Предложены основные сферы применения разработанного теплоизоляционного пеносиликата.

Ключевые слова: теплоизоляция, промышленные отходы, пеносиликат, модификация.

В настоящее время в России производят недостаточное количество современных эффективных, экологичных и безопасных теплоизоляционных материалов с высокой долговечностью.

Основная роль теплоизоляционного материала, применяемого в зданиях, сооружениях, трубопроводах и на технологическом оборудовании, — это обеспечение низкого уровня потерь тепловой энергии. Одним из признанных специалистами типов теплоизоляции, обладающих уникальным комплексом свойств, сочетающим в себе эффективность, долговечность, экологическую и пожарную безопасность, является пеностекло.

Пеностекло — теплоизоляционный материал с ячеистой структурой. Сырьем для производства изделий из пеностекла (плит, блоков) служит смесь тонкоизмельченного стеклянного боя с газообразователем [1]. Недостатками известных составов для изготовления пеностекла из тонкоизмельченного специально сваренного стекла или из боя стекла являются высокие энергозатраты при специальной варке стекла (осуществляется при 1400–1450 °C), а также прямая зависимость производства от объема технологических и бытовых отходов стекла в случае их использования в качестве основного источника сырья.

Применение различных модифицирующих добавок, в том числе и промышленных отходов, совместно со стеклобоем позволяет уменьшить потребление последнего, а также снижает экологическую нагрузку на окружающую среду. Но при этом стоит проблема влияния химического состава этих добавок на процесс получения и конечные свойства материала. Изучение этих процессов — важнейшая задача большинства исследований, ведущихся на сегодняшний день [2].

На кафедре химической технологии стекла и керамики Владивостокского государственного университета были разработаны составы и способ получения теплоизоляционного пеносиликата, модифицированного промышленными отходами, содержащими значительное количество оксида железа (III).

В процессе получения данного материала использовались следующие вещества:

- бой тарного зеленого стекла марки ЗС, химический состав которого соответствует ГОСТ Р 52022–2003 и содержит (мас. %): 71,0 SiO₂, 3,5 Al₂O₃ + Fe₂O₃, 11,0 CaO + MgO, 14,0 Na₂O, 0,3 SO₃, 0,2 Cr₂O₃;
- отходы metallurgического производства (ТУ0790–012–99637759);
- порообразователь—графит марки П-418, соответствующий требованиям ГОСТ 8295–73.

Главное требование, предъявляемое к отходам, — наличие большого количества Fe₂O₃ (>30 мас. %). По содержанию основного компонента (Fe₂O₃) отходы, используемые в работе, удовлетворяют требованию и имеют состав, представленный в таблице.

Массовая доля оксидов в отходах metallurgического производства

Массовая доля оксида, %									
Fe ₂ O ₃	ZnO	CaO	SiO ₂	MnO	MgO	PbO	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅
52,72	18,04	15,51	4,63	4,25	2,04	1,58	0,55	0,39	0,29

Основные этапы получения пеносиликата схожи с технологическими операциями производства классического пеностекла на основе стеклобоя и включают в себя: совместный помол компонентов, увлажнение полученной шихты, прессование заготовки, вспенивание ее и отжиг в муфельной печи, механическую обработку в готовое изделие. После чего, в соответствии с ГОСТ 17177–94, материал подвергался испытаниям на нахождение свойств (плотности, водопоглощения, максимального диаметра пор и теплопроводности).

В процессе получения образцов пеносиликата технологические и композиционные параметры были стабилизированы, а на их качественные характеристики оказывали влияние только концентрация metallurgических отходов с высоким содержанием Fe₂O₃, содержание порообразователя и температура вспенивания. Далее на основании полученных результатов с помощью методов математического моделирования выведены адекватные уравнения регрессии и построены поверхности отклика (рис. 1–3), характеризующие поведение системы при различных входных параметрах.

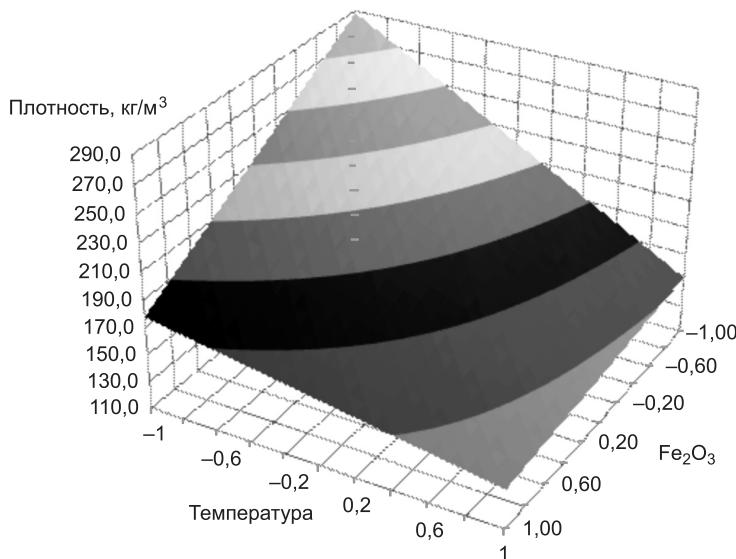


Рис. 1. Зависимость плотности пеносиликата от температуры вспенивания и концентрации отходов железа при содержании графита на уровне [+1]

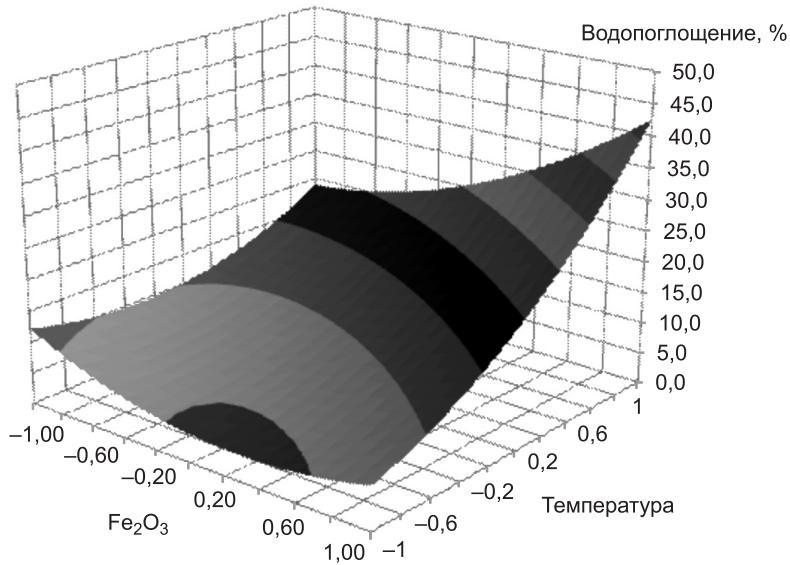


Рис. 2. Зависимость водопоглощения пеносиликата от концентрации оксида железа и температуры вспенивания при содержании графита на уровне [+1]

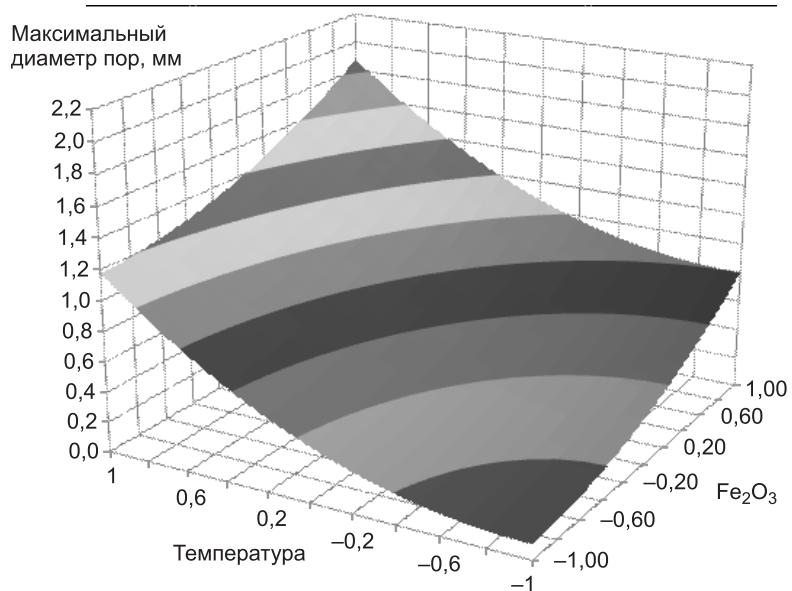


Рис. 3. Зависимость максимального диаметра пор пеностекла от содержания оксида железа и температуры вспенивания при содержании графита на уровне [+1]

Как видно из рис. 1, плотность снижается при повышении температуры вспенивания и концентрации отходов metallurgического производства. В количественном выражении значение плотности находится в пределах от 288 до 138 кг / м³, что примерно соответствует плотности обычного пеностекла, полученного при этих же температурах, но при этом идет сокращение потребности в стеклобое и осуществляется утилизация отвалов с отходами. Значение теплопроводности пеносиликата достигает 0,06 Вт/(м · К).

Исследуя поверхность, представленную на рис. 2, было отмечено, что водопоглощение повышается с увеличением температуры вспенивания и содержания металлургических отходов с высокой концентрацией Fe_2O_3 . При анализе похожих зависимостей, где содержание порообразователя находилось на уровне от [-1] до [+1], установлено, что водопоглощение (по минимальному значению) с увеличением содержания графита падает от 8 % на уровне [-1] до 4 % на уровне [+1]. Таким образом, водопоглощение полученного материала находится в пределах значений водопоглощения пеностекла (5 %).

По представленной на рис. 3 зависимости можно сделать вывод о росте диаметра пор образцов с увеличением температуры вспенивания и содержания металлургических отходов с высокой концентрацией оксида железа. При анализе похожих зависимостей, где содержание порообразователя находилось на уровне от [-1] до [+1], выявлено, что максимальный диаметр пор с увеличением содержания графита уменьшается.

Таким образом, полученный пеносиликат на основе стеклобоя, графита и металлургических отходов с высокой концентрацией Fe_2O_3 обладает более низкими показателями плотности, водопоглощения и диаметра пор в сравнении с обычным пеностеклом. Теплопроводность разработанного пеносиликата составила порядка 0,06 Вт/(м·К), что позволяет использовать его в качестве современного теплоизоляционного материала при строительстве зданий и сооружений различного назначения. Совокупность высоких свойств и простой технологии получения делает его конкурентоспособным на рынке строительной теплоизоляции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Демидович, Б.К. Производство и применение пеностекла [Текст]/ Б.К. Демидович. — Минск : Наука и техника, 1972. — С. 304.
2. Канаев, А.Ю. Теплоизоляционный пеномагнезиальный отходами металлургической промышленности [Текст] / А.Ю. Канаев, И.А. Христофорова, А.И. Христофоров // Строительство и реконструкция. — 2012. — № 1. — С. 69–73.

КАНАЕВ Андрей Юрьевич, асп.; E-mail: kanaev.aj@gmail.com
Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
ХРИСТОФОРОВА Ирина Александровна, д-р техн. наук, проф.; E-mail: khristoforova-i@mail.ru
Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
ХРИСТОФОРОВ Александр Иванович, д-р техн. наук, проф.
Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

Получено 01.06.12

Kanaev Andrey Yurevich, post-graduate student, Vladimir State University named after Aleksander and Nikolay Stoletovs, Russia

Khristoforova Irina Aleksandrovna, doctor of technical sciences, professor, Vladimir State University named after Aleksander and Nikolay Stoletovs, Russia

Khristoforov Aleksander Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Vladimir State University named after Aleksander and Nikolay Stoletovs, Russia

FOAM SILICATE, MODIFICATED BY THE FERROXIDE INDUSTRIAL WASTE

Present-day methods production of porous construction heat-insulating materials with application of industrial waste is considered in article. Introduction of ferrioxide industrial waste to the process technology of production of foam silicate is suggested. Influence of temperature regime of foaming and concentration of waste on behavior properties of obtained material for example density, water absorption and diameter of pore is presented on the basis of mathematical models approach. The main spheres of application of obtained heat-insulating foam silicate is suggested.

Key words: heat-insulation, industrial waste, foam silicate, modification.

REFERENCES

1. Demidovich, B.K. Production and application of foamglass [Text] / B.K. Demidovich. — Minsk: Science and Engineering, 1972. — P. 304.
 2. Kanaev, A.Yu. Heat-insulated foam aluminosilicate, modificated by the waste of metallurgy industry [Text] / A.Yu. Kanaev, I.A. Khristoforova, A.I. Khristoforov // Building and reconstruction. — 2012. — N 1. — P. 69–73.
-

УДК 691.175 : 678.664

А.Н. КОНОНОВ, Г.А. ЗИМАКОВА

ВЗАЙМОДЕЙСТВИЕ ГИДРОАКТИВНОГО ПОЛИУРЕТАНА С ВОДОЙ

Физико-химические свойства пенополиуретанов позволяют получать составы, активно взаимодействующие с водой, так называемые гидроактивные пенополиуретаны. В результате рассмотрения работы гидроизоляционного слоя на основе гидроактивного пенополиуретана была установлена необходимость введения в его состав добавок для исключения образования солей при твердении гидроизоляционного слоя, для уменьшения степени смачиваемости поверхности пенополиуретановой пленки и увеличения проникающей способности материала.

Ключевые слова: пенополиуретан, гидроактивный, пористость, сульфаты, смачиваемость поверхности, капиллярный подсос.

Необходимость применения гидроизоляции связана со способностью материалов к капиллярному подъему воды. При неработающей гидроизоляции стены здания находятся в увлажненном состоянии, и как следствие происходит разрушение конструкций, вызванное морозной деструкцией и коррозией материала. В зданиях с эксплуатируемыми цокольными этажами вопрос защиты конструкций от воздействия влаги можно решить только устройством горизонтальной изоляции методом инъектирования и устройством вертикальной изоляции. В качестве инъекционного состава рассматривается возможность применения гидроактивного полиуретана.

Свойства полиуретанов изменяются в очень широких пределах (в зависимости от природы и длины участков цепи между уретановыми группировками, от структуры — линейная или сетчатая, молекулярной массы, степени кристалличности и др.). Полиуретаны могут быть вязкими, жидкими или твердыми (аморфными или кристаллическими) продуктами — от высокоэластичных мягких резин до жестких пластиков (твёрдость по Шору от 15 по шкале А до 60 по шкале D соответственно).

Возможности получения разнообразных материалов заложены в особенностях химического строения полиуретанов и неограниченных возможностях регулирования их структуры. Путем изменения степени сшивания теоретически можно получать полимеры с любыми физико-механическими свойствами, характерными для пластиков — от термопластичных до термореактивных. Кроме того, физико-механические свойства этих полимеров можно изменять варьированием химических групп, находящихся между уретановыми звенями, что приводит к их более тонким изменениям.

Физико-химические свойства пенополиуретана позволяют получать составы, активно взаимодействующие с водой, так называемые гидроактивные пенополиуретаны. Процесс образования пенополиуретанов гораздо сложнее, чем процессы, протекающие при получении невспененных полиуретанов, поскольку здесь приходится сталкиваться с явлениями, характерными для коллоидных систем. Для того чтобы иметь ясное пред-

ставление о процессе пенообразования, нужно знать основные реакции, в результате которых происходят образование газа и рост макромолекул, коллоидную химию формирования пузырьков пены, а также реологию полимера в процессе его отверждения. Для улучшения пенообразования к системе обычно добавляют воду, за счет реакции которой с изоцианатом выделяется углекислый газ, необходимый для вспенивания:



В результате протекания реакции получается материал с замкнутой пористой структурой.

Теоретически путем изменения степени сшивания и комбинирования химических групп, находящихся между уретановыми звенями в молекуле полимера, можно получать полимеры любой жесткости, причем возможности эти по существу не ограничены. Даже в простейших линейных полимерах всегда имеются два радикала, варьируя которыми можно придать полимерам различные свойства. Обычно используют разветвленные полимеры, в которых имеется не два, а три, четыре или более различных радикалов. Этим разнообразием свойств материалов на основе полиуретанов и объясняется их широкое применение в промышленности в настоящее время.

Цель работы — опытным путем изучить особенности реакции пенополиуретана (ППУ) с водой, а также выявить недостатки и определить оптимальные условия применения состава для гидроизоляции конструкций.

При изучении взаимодействия гидроактивного полиуретана с водой применялся жесткий двухкомпонентный полиуретан марки Vitrofan 3633. Опыт по измерению зависимости увеличения объема гидроактивного полиуретана от количества воды проводился при нормальной влажности и температуре около + 25 °C. Компоненты А и В материала смешивались в пропорции 1:1.

В результате проведения опыта было установлено, что скорость твердения и структура образующейся пены во многом зависят от среды, в которой происходит процесс пенообразования. Так, пена, образовавшаяся на открытом воздухе, затвердела в течение одного часа, а пена, образующаяся в закрытом объеме, сохранила эластичность и не изменила свойств даже через месяц после проведенных испытаний.

В строительных конструкциях при инъектировании состава в шпуры не возникает условий для расширения материала в «свободном» объеме, пенообразование идет в условиях ограниченного доступа воздуха. При проведении опытов учитывались реальные условия применения состава путем имитации протекания реакции в ограниченном объеме.

В последнее время для гидроизоляции деформационных швов применяется метод инъектирования (закачки) швов гидроактивными и вспенивающими полимерами. Он достаточно эффективен при связывании рассыпающихся почв, обводненных грунтов, больших объемов воды в заобделочном пространстве для герметизации и санации дефектов в бетоне (трещины, раковины и др.).

Однако применение метода инъектирования гидроактивными материалами для герметизации антисейсмических и деформационных швов (шире 20 мм) имеет ряд существенных недостатков:

- заинъектированная масса при отсутствии воды усыхает (до 200 %), оставляя шов пустым, и превращается в губку с открытыми порами (поролон), которая легко пропускает воду;

- невозможность герметизации шва при постоянном поступлении воды (активные протечки). Полимер постоянно разбивается поступаю-

щей водой и не полимеризуется. Даже если он полимеризовался, то его масса неоднородна, непрочна и неустойчива к давлению воды;

— залитая полимеризованная масса практически не набухает, и гидроизоляция обеспечивается в основном силой адгезии к бетону;

— работа с гидроактивными полимерами должна проводиться с тщательным соблюдением мер безопасности, так как они содержат толуилен-дизоцианат — токсичный продукт первого класса опасности по ГОСТ 12.1.007.

Результаты, полученные при проведении опытов, подтвердили выявленные ранее проблемы, которые проявились следующим образом. Установлено, что при неоптимальном соотношении «полимер — вода» распределение материала при закачке в шов будет обусловливать неконтролируемый процесс. Происходит большое и быстрое газовыделение (вспенивание), в результате чего образуются скрытые раковины и полости, что влияет на однородность, прочность уплотнения и надежность герметизации (табл. 1).

При проведении опыта было установлено, что оптимальная пористость, наибольшее увеличение объема пенополиуретана при полном вовлечении в реакцию воды получается при отношении вода : полимер = 2:3.

Для изучения работы гидроизоляционного слоя в кирпичной кладке были заформованы керамические образцы размером $2 \times 4 \times 16$ см, которые склеивались попарно гидроизоляционным составом, приготовленным в соответствии с установленным оптимальным соотношением вода : полимер 2:3, таким образом, получались образцы размером $4 \times 4 \times 16$ см.

Изучение керамических образцов показало, что примененный гидроизоляционный состав обладает высокой адгезией, о чем свидетельствуют частицы керамики, остающиеся на излишках пены при ее удалении (рис. 1). На границе воздух — гидроизоляционный состав при твердении пены образуется большой объем сульфатных соединений, что в свою очередь может привести к засаливанию стеновых конструкций и развитию химической коррозии (рис. 2).

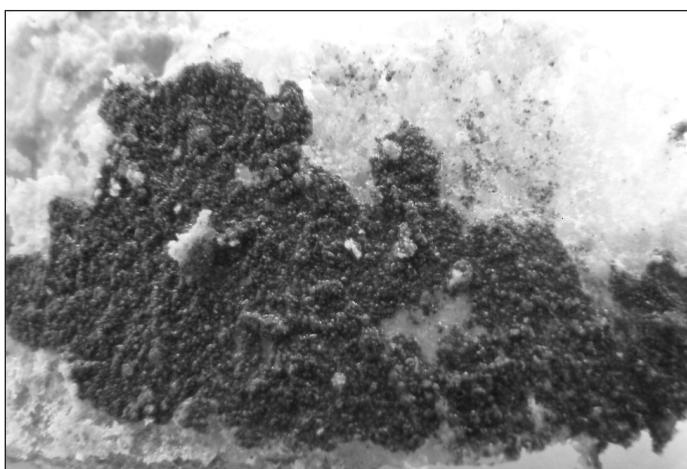


Рис. 1

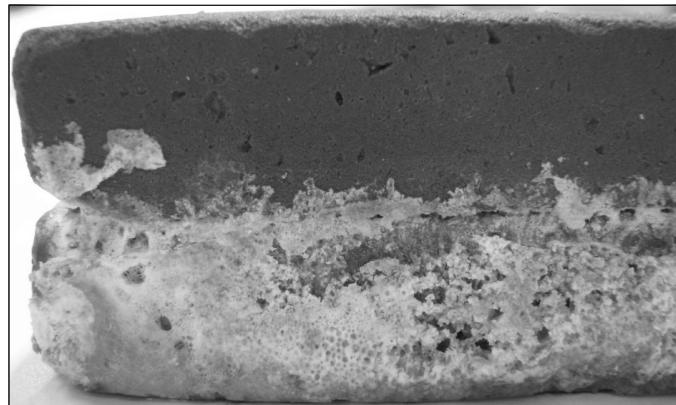


Рис. 2

В соответствии с ГОСТ 7025–91 «Кирпичи и камни керамические и силикатные. Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости» были проведены испытания образцов на морозостойкость [2]. На 15-м цикле произошло разрушение одного из образцов в сечении, где гидроизоляционный слой имеет структуру пористой пены. При рассмотрении его структуры выделены три структурные зоны: 1) тонкая пленка; 2) покрытие с мелкой «перистостью»; 3) пористая пена.

Область с тонкопленочным покрытием была изучена на предмет смачиваемости поверхности. Смачивание — это поверхностное явление, заключающееся во взаимодействии жидкости с поверхностью твердого тела или другой жидкостью при условии, что присутствует третья (обычно, но не обязательно, газовая) фаза, причем происходит одновременный контакт всех этих трех несмешивающихся фаз. Смачивание бывает двух видов:

— иммерсионное (вся поверхность твердого тела контактирует с жидкостью);

— контактное (состоит из трех фаз — твердая, жидкая, газообразная).

Смачивание зависит от соотношения между силами сцепления молекул жидкости с молекулами (или атомами) смачиваемого тела (адгезия) и силами взаимного сцепления молекул жидкости (когезия).

Различают три случая контактного смачивания:

1) несмачивание, когда $180^\circ > q_0 > 90^\circ$, где q_0 — краевой угол смачивания;

2) ограниченное смачивание, когда $90^\circ > q_0 > 0^\circ$, где q_0 — краевой угол смачивания;

3) полное смачивание, когда капля растекается в тонкую пленку.

Эти расхождения обусловлены дефектами поверхности твердого тела: шероховатостями (микрорельеф), химической неоднородностью (гетерогенность), наличием пор, локальными деформациями вблизи линий смачивания (они достаточно заметны при смачивании тел с малыми модулями упругости).

Для определения смачиваемости поверхности на образец, покрытый пенополиуретановой пленкой, была помещена капля воды (рис. 3). В результате проведения опыта было установлено, что угол, образуемый поверхностью твердого тела и плоскостью касательной к поверхности жидкости, лежит в интервале $0\text{--}90^\circ$. Таким образом, можно сделать вывод об ограниченном смачивании поверхности образца.

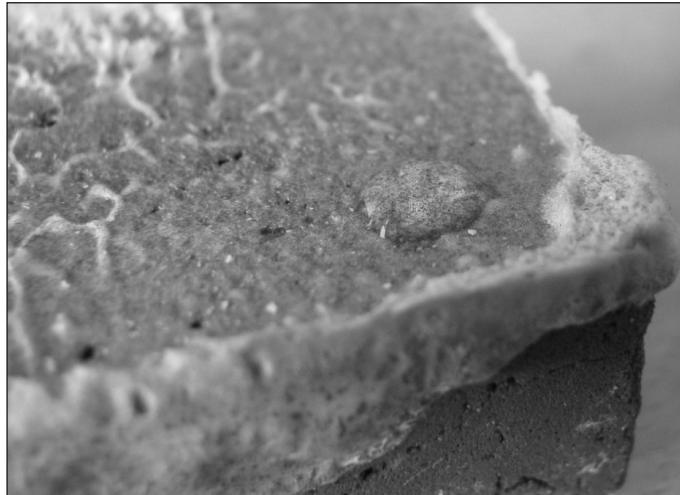


Рис. 3

Методы регулирования смачивания основаны главным образом на изменении удельных поверхностных энергий s_s и s_{sl} , а также поверхностного натяжения жидкости s_l , где s_s и s_{sl} — соответственно удельные свободные поверхностные энергии твердого тела на границе с газом и в контакте со смачивающей жидкостью. Наиболее универсальный метод регулирования смачивания состоит в использовании поверхностно-активных веществ (ПАВ). Растворение ПАВ в жидкости уменьшает ее поверхностное натяжение; вместе с тем возможна адсорбция ПАВ на границе твердое тело — жидкость с соответствующим изменением поверхностной энергии s_{sl} . Введение ПАВ приводит к образованию на поверхности твердого тела адсорбционных слоев, которые могут частично или полностью «экранировать» жидкость.

Образцы-балочки, имеющие гидроизоляционный слой, были испытаны на способность противодействовать капиллярному подсосу. Для этого образец высушивался до постоянной массы и помещался в жидкость таким образом, чтобы уровень жидкости был ниже гидроизоляционного слоя. Наблюдения показали, что в течение 2–3 минут с момента помещения в жидкость влага путем капиллярного подсоса смачивала часть образца, находящуюся выше уровня гидроизоляции (рис. 4).

На основании полученных результатов можно сделать выводы о необходимости изменения физико-химических свойств рассматриваемого

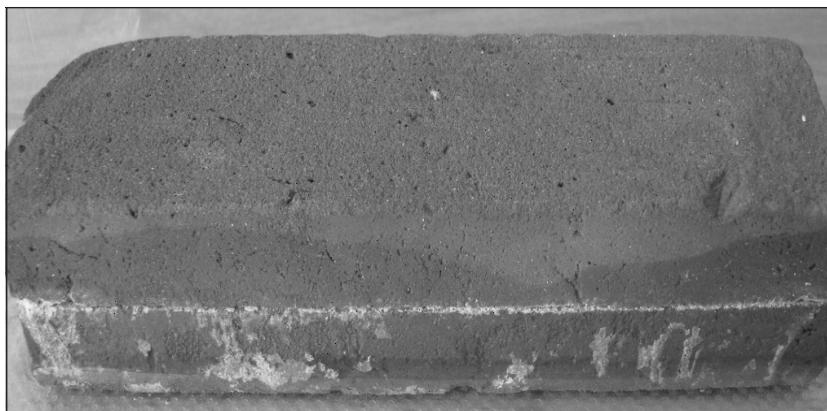


Рис. 4

пенополиуретана для исключения образования солей при его твердении, для уменьшения степени смачиваемости поверхности пенополиуретановой пленки и увеличения проникающей способности материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Булатов, Г.А. Пенополиуретаны в машиностроении и строительстве [Текст] / Г.А. Булатов // Машиностроение. — М., 1978.
2. ГОСТ 7025–91. Кирпичи и камни керамические и силикатные. Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости.

КОНОНОВ Александр Николаевич, асп.; E-mail: KononovAN@72to.ru
Тюменский государственный архитектурно-строительный университет
ЗИМАКОВА Галина Александровна, канд. техн. наук, доц.
Тюменский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 02.05.12

Kononov Alexander Nikolaevich, post-graduate student; E-mail: KononovAN@72to.ru,
Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering, Russia
Zimakova Galina Alexandrovna, candidate of technical sciences, assistant professor,
Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

THE INTERACTION BETWEEN HYDRO-ACTIVE POLYURETHANE AND WATER

Physical-chemical properties of polyurethane foam let produce compositions which are aggressively interactive with water, so called hydro-active polyurethane foam. As a result of hydro-active polyurethane foam waterproofing layer consideration a necessity of salification termination agents injection. Salification is caused with hardening of waterproofing layer. Injection of salification termination agents is used for decreasing a polyurethane foam surface degree of wetness and increase penetration ability of the material.

Key words: polyurethane foam, hydro-active, porosity, sulphate, degree of wetness, capillary suction.

REFERENCES

1. Bulatov, G.A. Polyurethane foam use in engineering and construction [Text] / G.A. Bulatov // Engineering. — M., 1978.
2. State Standard 7025–91. Bricks and building tiles and silicate tiles. Methods of water absorption, density and resistance to frost definition.

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 628.16.066.001.24

Ю.Л. СКОЛУБОВИЧ, О.А. БОЙКО, С.М. ЗЕРКАЛЬ, С.В. РОГАЗИНСКИЙ,
Е.Л. ВОЙТОВ, А.Ю. СКОЛУБОВИЧ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ КОНТАКТНОЙ МАССЫ

Разработана математическая модель, достоверно отображающая работу реактора-осветителя с псевдоожиженнной контактной массой. Достоинством модели является наличие одного подбираемого коэффициента — коэффициента плотности прилипания частиц примеси к зернам фильтрующего слоя.

Ключевые слова: математическая модель, процесс очистки, фильтрующий слой, контактная масса, реактор-осветитель, гидролиз, коэффициент, плотность, частицы примеси, скорость, моделирование движения, расчет параметров.

Одним из наиболее распространенных способов очистки природных вод является ее реагентная обработка коагулянтами и флокулянтами с последующей сепарацией в отстойниках и фильтрованием через зернистую контактную загрузку. Разработка новых схем и конструкций фильтров-осветителей — актуальная современная задача. Поиск оптимальных режимов работы новых конструкций наиболее эффективно проводить на основе математического моделирования физических процессов при очистке водных растворов [1]. Новым технологическим решением проблемы очистки природной воды является создание конструкций реакторов-осветителей нового поколения с осветлением воды в псевдоожиженнном контактном

слое частиц зернистой структуры, например, из кварцевого песка [1].

С целью создания модели рассмотрим принципиальную схему реактора-осветителя (рис. 1). Очищаемая вода с введенным коагулянтом подается в цилиндрический сосуд под давлением, которое удерживает зерна контактной загрузки во взвешенном состоянии в области (1-1', 2-2'). В результате реакции гидролиза и образования гидроксидов создаются условия метастабильности системы и возникновения зародышей новой фазы. Продукты гидролиза адсорбируются на поверхности зерен контактной загрузки.

Одновременно с образованием зародышей происходит их рост, последующее формирование и послойное накопление на поверхности зерен прочного структурированного осадка. Осадок, в свою очередь, адсорбирует

© Сколубович Ю.Л., Бойко О.А., Зеркаль С.М., Рогазинский С.В., Войтов Е.Л.,
Сколубович А.Ю., 2012

частицы загрязнений из очищаемой воды. За счет налипания хлопьев в слое загрузки происходит увеличение площади поверхности частиц зерен во взвешенном состоянии, что способствует процессу захвата хлопьев. Обратный процесс, т.е. отрыв хлопьев от зерна, наблюдается при изменениях физических условий, например, скорости движения воды относительно частицы зерна. В качестве определяющего параметра можно рассматривать величину касательного напряжения для хлопьев, превышение значения которого обеспечивает отрыв частиц примеси и вынос их в поток воды. Это приводит к снижению эффективности процесса очистки воды. Процесс технологической очистки воды заканчивается, когда степень загрязнения очищенной воды начинает превышать допустимые нормы, т.е. когда разность скоростей прямого (прилипание частиц примеси к зернам) и обратного процессов (отрыв частиц примеси от зерен) сравниваются. С другой стороны, прямой и обратный процессы можно охарактеризовать следующим образом. Если пористость слоя и плотность прилипших частиц равны некоторым предельным значениям, то считается, что данный слой уже не участвует в процессе очистки воды, а именно количество входящей в слой примеси равно количеству примеси, прошедшей через слой.

Во время работы фильтра изменяются его параметры, такие, например, как размер зерен загрузки, их средняя плотность, скорость очищаемой воды внутри взвешенного слоя, количество (концентрация) задержанной примеси в слое в зависимости от их координаты внутри взвешенного слоя.

С целью формирования математической модели разделим взвешенный слой на N подслоев. Высоту подслоя следует брать достаточно малую, но не меньше определенного предела, при котором теряется физический смысл, и достаточно большим, при котором параметры соседних подслоев будут заметно отличаться. Нумерацию подслоев будем начинать в точке входа очищаемой воды во взвешенный слой, подслой перпендикулярны среднему направлению вектора скорости воды (рис. 2).

На первоначальном этапе формирования модели будем считать, что параметры внутри каждого подслоя имеют среднее значение, т.е. если в подслое задержано n частиц, то они равномерно распределены по всем зернам загрузки данного подслоя. Обозначим: $R_i(n)$ — средний радиус одного зерна коагуляции в i -м слое в зависимости от количества прилипших частиц примеси n ; $R_{\text{пр}}$ — радиус одной частицы примеси (будем считать, что все частицы примеси имеют одинаковую элементарную размерность); $V_i^{\text{слои}}(n)$ — объем всех частиц загрузки i -го подслоя с учетом объема захваченных частиц примеси; n_z — количество частиц зерен загрузки взвешенного слоя.

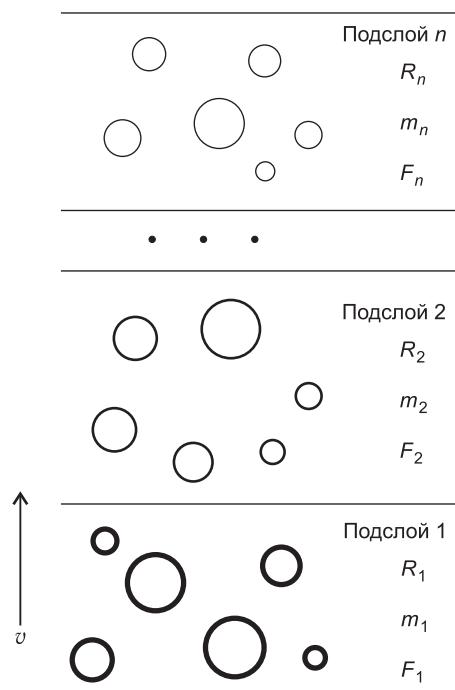


Рис. 2. Слоистая структура взвешенного слоя

R_1, R_2, \dots, R_n — средний радиус зерен загрузки каждого подслоя; m_1, m_2, \dots, m_n — пористость соответствующих подслоев; F_1, F_2, \dots, F_n — количество задержанной примеси в каждом подслое

Примем одинаковым количество зерен загрузки в каждом подслое. После задержания n частиц примеси в i -м подслое общий объем частиц загрузки изменяется по формуле

$$V_i^{sloi}(n) = \frac{n_z}{N} \frac{4}{3} \pi R_z^3 + K \cdot n \cdot \frac{4}{3} \pi R_{np}^3,$$

где K — коэффициент плотности задержания частиц примеси в слое загрузки;

$n_z = m \frac{1}{\frac{4}{3} \pi R_z^3}$ — количество зерен загрузки (в 1 м³);

m — начальная пористость слоя.

Таким образом, радиус одной частицы примеси i -го подслоя в зависимости от количества задержанной примеси в среднем составляет

$$R_i(n) = \sqrt[3]{R_z^3 + K \cdot \frac{N}{n_z} \cdot n \cdot R_{np}^3}. \quad (1)$$

Объем скелета загрузки i -го подслоя в зависимости от количества прилипших частиц примеси пересчитывается по формуле

$$m_i(n) = n_z \cdot \frac{4}{3} \pi (R_i(n))^3. \quad (2)$$

Статистический, т.е. случайный характер движения частиц примеси, позволяет применить метод Монте-Карло для исследования их прохождения через взвешенный слой частиц зерен контактной массы [3, 4]. В общей постановке задача может быть рассмотрена следующим образом (рис. 3). На границе с контактной массой запускаются частицы примеси

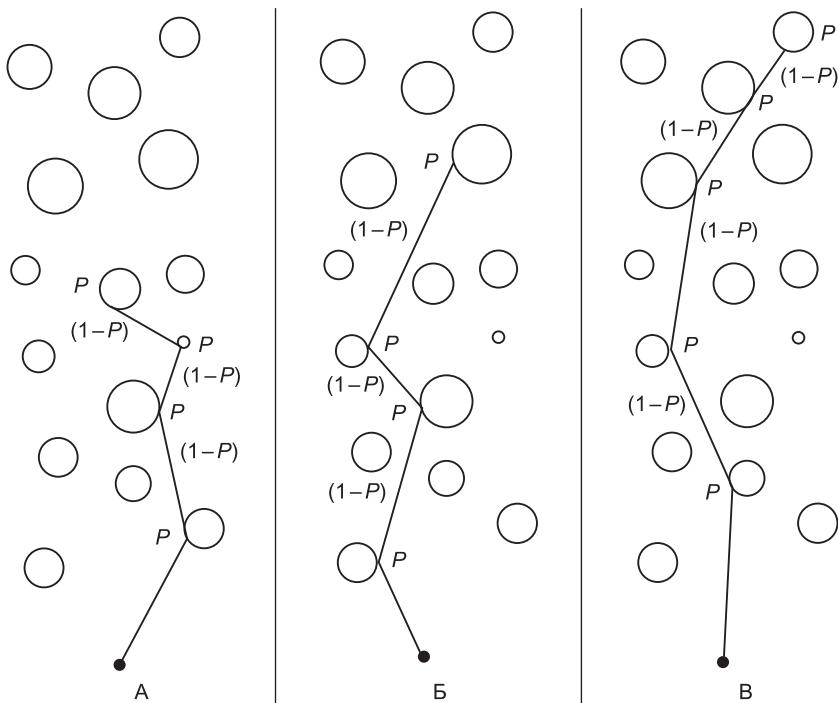


Рис. 3. Характерные траектории движения частицы примеси в слое фильтра до прилипания к зерну загрузки

со скоростью \vec{V}_t , совпадающей со скоростью жидкости. Движение каждой частицы примеси прерывается столкновением с частицей зерна загрузки. Частица прилипает к зерну с некоторой вероятностью P , и на этом этапе ее движение прекращается. С вероятностью $(1 - P)$ движение частицы продолжается, при этом считается, что произошло изотропное рассеяние, и движение частицы повторяется вновь в расчетной области.

Метод Монте-Карло заключается в определении случайной величины x исходя из случайного числа R , равномерно распределенного на интервале $[0, 1]$: функция распределения $F(x) = \int_0^x f(t)dt$ приравнивается к

случайному числу R : $F(x) = R$, откуда определяется случайная величина x .

В качестве масштаба длины в данный момент времени используется длина свободного пробега пробной частицы (частицы примеси) до столкновения с другими частицами (зернами загрузки фильтрующего слоя) $\lambda_0 = 1/n\sigma$, где n — числовая концентрация зерен, $\sigma = \pi \cdot (r_z + r_{\text{пр}})^2$ — сечение взаимодействия частиц зерна и примеси, которое учитывает текущие параметры зерен загрузки [2].

Таким образом, моделирование движения каждой частицы состоит из следующих этапов.

1. *Запуск частицы (задание случайного направления движения).* Случайный вектор направления движения соответствует случайной точке, равномерно распределенной по поверхности единичной сферы. Совместная плотность распределения случайной точки на единичной сфере в сферических координатах (ϕ, ψ) : $0 \leq \phi \leq \pi$, $0 \leq \psi \leq 2\pi$ составляет $P(\phi, \psi)d\phi d\psi = \frac{\sin\phi d\phi d\psi}{4\pi}$.

Плотность распределения по ϕ определяется интегрированием $P(\phi, \psi)$ по ψ :

$$P_\phi(\phi) = \int_0^{2\pi} P(\phi, \psi)d\psi = \frac{\sin\phi}{2}.$$

$$\text{В свою очередь, } P_\psi(\psi) = \frac{1}{2\pi}.$$

Поскольку $P(\phi, \psi) = P_\phi(\phi) \cdot P_\psi(\psi)$, то ϕ и ψ независимы. Так как задача одномерная, достаточно определить угол ϕ :

$$\int_0^\phi P_\phi(\phi)d\phi = \int_0^\phi \frac{\sin\phi}{2}d\phi = R_\phi, \frac{1}{2}(-\cos\phi) \Big|_0^\phi = \frac{1}{2}(-\cos\phi) = R_\phi, \cos\phi = 1 - 2R_\phi,$$

где R_ϕ — равномерно распределенное на $[0, 1]$ случайное число. При запуске частиц $\cos\phi \geq 0$.

2. *Моделирование движения частицы по прямой в выбранном направлении.* Длина свободного пробега распределена с плотностью распределения $f_\lambda = 1/\lambda_s e^{-\lambda/\lambda_s}$,

где λ_s — средняя длина свободного пробега пробной частицы примеси.

Значение λ определяется из уравнения $\int_0^\lambda f_\lambda d\lambda = R$,

где $R \in [0, 1]$ — равномерно распределенное случайное число,

$$\frac{1}{\lambda_s} \int_0^\lambda e^{-\frac{\lambda}{\lambda_s}} d\lambda = -e^{-\frac{\lambda}{\lambda_s}} \Big|_0^\lambda = 1 - e^{-\frac{\lambda}{\lambda_s}} = R, \lambda = -\lambda_s \ln(1-R),$$

что эквивалентно $\lambda = -\lambda_s \ln(R)$.

3. *Моделирование прилипания частицы примеси к частице зерна с заданной вероятностью P .* При заданной величине вероятности прилипания P разыгрывается случайное число $R_p \in [0, 1]$, если $R_p \leq P$ — частица прилипает, в противном случае от текущей координаты примеси (с учетом текущих параметров фильтрующего слоя по пространству) разыгрывается новая длина пробега, моделируется вероятность прилипания, т.е. алгоритм повторяется с п.2 до момента прилипания частицы примеси или выхода ее за пределы фильтрующего слоя.

4. *Перерасчет параметров взвешенного слоя.* В случае, если частица задержана во взвешенном слое контактной массы, определяется подслой, в котором произошло прилипание, затем пересчитываются параметры, такие как средний радиус зерен загрузки, пористость, количество (объем) задержанных частиц примеси по формулам (1) и (2). Если пористость подслоя превысила допустимое значение, считается, что данный подслой в дальнейшем осветлении воды (фильтровании) не участвует. Другими словами, если частица была задержана в данном подслое, то частица такого же размера будет вытолкнута из подслоя, движение которой в дальнейшем и моделируется.

В результате численного эксперимента получена модель фильтра со следующими параметрами [1].

1. Высота взвешенного слоя составляет $H = 1,4$ м.
2. Радиус зерен загрузки в виде дробленого кварца равен $r_z = 0,6$ мм.
3. Концентрация мутности в исходной воде, в фильтрате представлена на рис. 4.
4. Скорость подачи очищаемой воды в реактор-осветлитель составляет $v = 8$ м/ч.

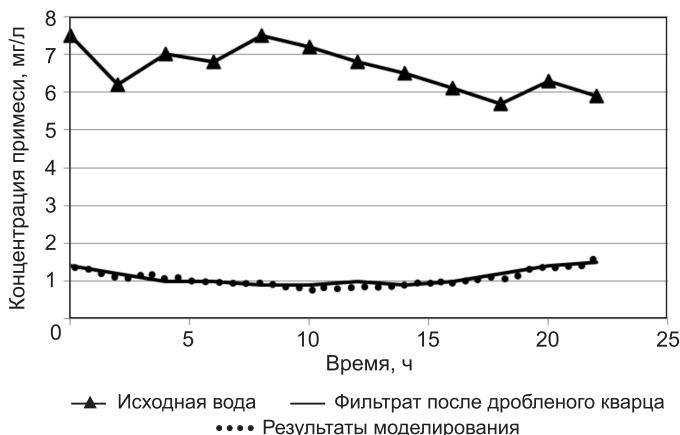


Рис. 4. Зависимость качества воды от продолжительности фильтрования

Начальный и конечный объем скелета загрузки принимался соответственно 0,47 и 0,62.

Характерный размер примеси для процесса фильтрования составляет $r_{pr} = 2,752 \cdot 10^{-5}$ м.

В численном эксперименте был подобран средний коэффициент плотности прилипания частицы примеси к зернам фильтрующего слоя. Данный коэффициент определяет объемную долю объема задержанной частицы при-

меси к окружающему объему зерна загрузки. Также можно утверждать, что данный коэффициент отражает и объемную долю застойных зон.

Из результатов математического моделирования вытекает, что оптимальный коэффициент плотности прилипания для фильтрующего слоя, состоящего из дробленого кварца, равен 160.

Экспериментальная кривая хорошо согласуется с вычислительным экспериментом. Среднее расхождение составляет 8,5 %, которое рассчитывалось по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_i (C^h(t_i) - C^*(t_i))^2}{\sum_i C^*(t_i)^2}},$$

где $C^h(t_i)$ — остаточная концентрация примеси в t_i момент времени по результатам математического моделирования;

$C^*(t_i)$ — остаточная концентрация примеси в t_i момент времени по результатам физического эксперимента.

Для реактора-осветителя (фильтра) с загрузкой из дробленого кварца имеется хорошее согласование результатов моделирования с экспериментом на всем протяжении работы фильтрующего слоя реактора-осветителя.

Выводы. 1. Построенная математическая модель достаточно хорошо отображает работу реактора-осветителя с активным веществом в виде дробленого кварца.

2. Существенным достоинством разработанной модели является наличие только одного подбираемого коэффициента — коэффициента плотности прилипания частиц примеси к зернам фильтрующего слоя реактора-осветителя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Войтов, Е.Л. Подготовка питьевой воды из поверхностных источников с повышенным природным и антропогенным загрязнением : монография [Текст] / Е.Л. Войтов, Ю.Л. Сколубович. — Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2010. — 217 с.
2. Кикоин, А.К. Молекулярная физика [Текст] / А.К. Кикоин, И.К. Кикоин. — М. : Наука, 1976.— 250 с.
3. Ермаков, С.М. Курс статистического моделирования [Текст] / С.М. Ермаков, Г.А. Михайлов. — М. : Наука, 1976. — 320 с.
4. Titov, E. Analyses of Numerical Errors in the Kinetic Modeling of Microthruster Devices [Text] / E. Titov, D. Levin, S.V. Rogazinsky // Journal of thermophysics and heat transfer. — 2007. — Vol. 21, № 3. — P. 616–627.

СКОЛУБОВИЧ Юрий Леонидович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

БОЙКО Ольга Александровна, ст. препод.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

ЗЕРКАЛЬ Сергей Михайлович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

РОГАЗИНСКИЙ Сергей Валентинович, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск

*ВОЙТОВ Евгений Леонидович, канд. техн. наук, доц.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)
СКОЛУБОВИЧ Алексей Юрьевич, канд. техн. наук
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Получено 24.05.12

Skolubovich Yury Leonidovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Boyko Olga Alexandrovna, senior lecturer, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Zerkali Sergey Mihaylovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Rogazinsky Sergey Valentinovich, doctor of physical and mathematical sciences, senior researcher, Institute of computational mathematics and mathematical geophysics SB RAS, Russia

Voytov Evgeniy Leonidovich, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Skolubovich Alexey Yuryevich, candidate of technical sciences, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

NUMERICAL MODELING OF THE PROCESS PEELINGS WATER SOLUTION IN PSEUDO-LIQUEFACTION LAYER OF THE CONTECT MASS

Is designed mathematical model, realistically displaying working the reactor-clarifier with pseudo-liquefaction contact mass. Value to models is presence one selected factor — a factor to density of the adhesion of the particles admixture to grain filtering layer.

Key words: the mathematical model, the process peelings, the filtering layer, the contact mass, the reactor-clarifier, hydrolysis, the factor, density, the particles admixture, the velocity, modeling of the motion, the calculation parameter.

REFERENCES

1. Voytov, E.L. Preparation of drinking water from surface sources with raised natural and anthropogenous contamination : monograph [Text] / E.L. Voytov, Yu.L. Skolubovich. — Novosibirsk : NSUACE (Sibstrin), 2010. — 217 p.
2. Kikoin, A.K. The molecular physics [Text] / A.K. Kikoin, I.K. Kikoin. — M. : Science, 1976. — 250 p.
3. Ermakov, S.M. The course of statistical modeling [Text] / S.M. Ermakov, G.A. Mihaylov. — M. : Science, 1976. — 320 p.
4. Titov, E. Analyses of Numerical Errors in the Kinetic Modeling of Microthruster Devices [Text] / E. Titov, D. Levin, S.V. Rogazinsky // Journal of thermophysics and heat transfer. — 2007. — Vol. 21, N 3. — P. 616–627.

УДК 697.953.2 : 621.65

В.И. КОСТИН

РЕГУЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ НАСОСОВ И ВЕНТИЛЯТОРОВ ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ

Приводится анализ особенностей регулирования насосов и вентиляторов при совместной работе. Показана необходимость проверочного расчета после регулирования.

Ключевые слова: насосы, вентиляторы, совместная работа, регулирование.

Методы регулирования работающих совместно насосов и вентиляторов те же, что и для случая одиночной работы нагнетателей на сеть. Однако при совместной работе изменение параметров одного нагнетателя приводит к изменению параметров и другого нагнетателя, нерегулируемого. Примеры такого влияния можно найти, например, в работах [1, 2]. Выбор метода регулирования в данном случае следует производить с учетом следующих факторов.

1. Необходимо проверить соблюдение равенства давлений в точке слияния потоков после регулирования.

2. Требуемая степень регулирования достигается не мгновенно, а через некоторый промежуток времени, когда возможно кратковременное нарушение баланса давлений. Поэтому при параллельной работе во избежание гидравлических ударов или перетекания жидкости в обратном направлении после нагнетателя следует устанавливать обратный клапан.

3. Необходима проверка на отсутствие помпажа при глубоком регулировании методом дросселирования.

Следовательно, при совместной работе необходим анализ не только расчетного режима, но и режима регулирования.

I. Регулирование при параллельной работе

1. *Регулирование дросселированием.* Рассмотрим следующий случай. Два одинаковых нагнетателя с характеристикой $P-L$ работают параллельно на сеть cd с характеристикой $\Delta P - L_{cd}$ (рис. 1). Здесь L — производительность; P — давление нагнетателя; ΔP — потери давления в сети. Сопротивления участков раздельной работы ac и bc примем пренебрежимо малыми.

Рабочая точка системы — 1 (рис. 2). Точка 2 характеризует параметры одного нагнетателя при параллельной работе. С помощью дросселирования производительность первого нагнетателя уменьшена до величины L'_1 . После вычета потерь давления в дросселе получим условную характеристику на-

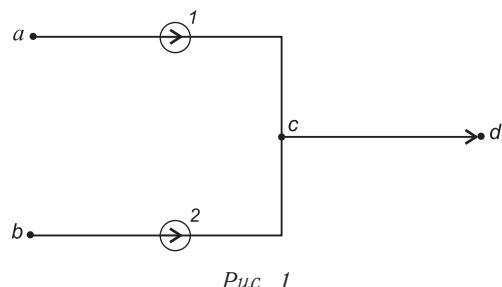


Рис. 1

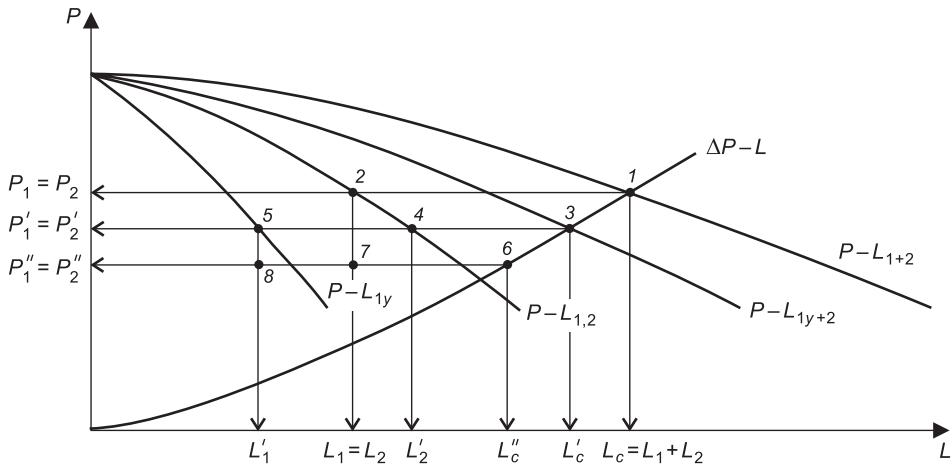


Рис. 2. Регулирование дросселированием при параллельной работе

гнетателя $P - L_y$ и системы двух нагнетателей — $P - L_{1y+2}$. Рабочими точками соответственно станут: для первого нагнетателя — 5, для второго — 4, для системы — 3. Производительность второго нагнетателя возрастет до величины L'_2 , что приведет к увеличению нагрузки на электродвигатель и перерасходу электроэнергии.

Поэтому для уменьшения производительности второго нагнетателя необходимо не только произвести его дросселирование, но и увеличить степень дросселирования первого нагнетателя. И требуемые расходы установятся, если условная характеристика первого нагнетателя пройдет через точку 8, второго — 7, суммарная — 6. В итоге установится расход $L''_c = L'_1 + L'_2$.

В случае регулирования всех нагнетателей (одинаковых или разных) необходимая степень регулирования может быть достигнута при условии выполнения изложенных в начале статьи требований.

2. Регулирование частотой вращения. Пусть требуемая производительность первого нагнетателя L'_1 системы, показанной на рис. 1, получена путем уменьшения его частоты вращения с n_1 до n_2 (рис. 3). Характеристика этого нагнетателя станет $P - L'_1$, суммарная системы — $P - L'_{1+2}$. Рабочие точки для первого нагнетателя — 5, для второго — 4,

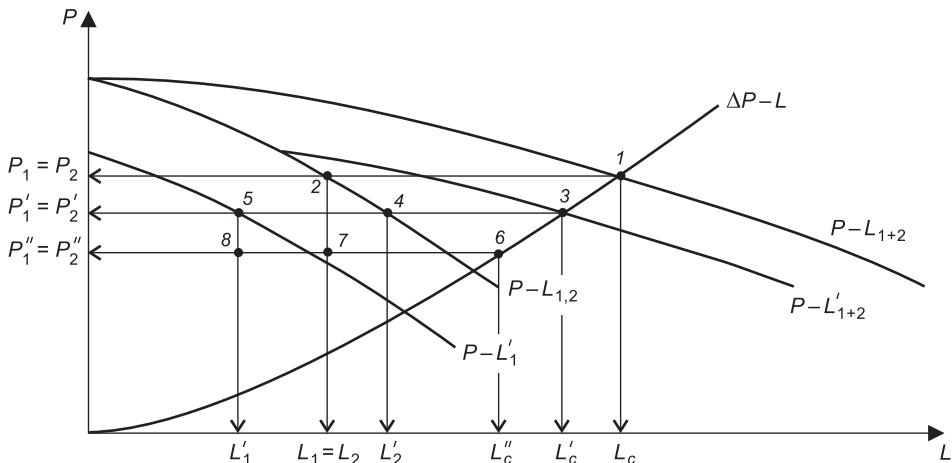


Рис. 3. Частотное регулирование при параллельной работе

для системы — 3. Производительность второго нагнетателя возрастет до величины L'_2 . Для снижения его производительности до первоначальной необходимо уменьшить частоты вращения обоих нагнетателей таким образом, чтобы новые характеристики нагнетателей прошли через точки: первого — 8, второго — 7, суммарная — 6. Достижение этих расходов возможно лишь с помощью плавных частотных регуляторов. Для случая ступенчатых регуляторов вращения, а также при необходимости неравномерной степени регулирования всех нагнетателей во избежание нарушения баланса давления в точке слияния потоков следует применять комбинированные регулирования (частотное и дросселирование). Справедливость этого положения видна из следующего примера.

Давление нагнетателя 1 $P_1 = 2000$ Па, потери давления на участке ac $\Delta P_1 = 1000$ Па, давление в точке с $P_{c1} = 2000 - 1000 = 1000$ Па. Давление нагнетателя 2 $P_2 = 1500$ Па, потери давления на участке bc $\Delta P_2 = 500$ Па. Давление в точке с $P_{c2} = 1500 - 500 = 1000$ Па, $P_{c1} = P_{c2}$.

Пусть производительность обоих нагнетателей необходимо уменьшить в 2 раза. Тогда частота вращения уменьшится тоже в 2 раза, давление и потери давления — в 4 раза. Параметры системы примут вид: $P'_1 = 2000 \cdot 0,25 = 500$ Па, $\Delta P'_{ac} = 1000 \cdot 0,25 = 250$ Па, $P'_{c1} = 500 - 250 = 250$ Па, $P'_2 = 1500 \cdot 0,25 = 375$ Па, $\Delta P'_{bc} = 500 \cdot 0,25 = 125$ Па, $P'_{c2} = 375 - 125 = 250$ Па, $P'_{c1} = P'_{c2}$.

Пусть теперь производительность второго нагнетателя необходимо уменьшить в 0,3 раза, а первого по-прежнему в 0,5 раза. Тогда частота вращения второго нагнетателя уменьшится в 0,3 раза, давление и потери давления на участке bc — в 0,09 раза ($0,3^2 = 0,09$), $P'_2 = 1500 \cdot 0,09 = 135$ Па, $\Delta P'_2 = 500 \cdot 0,09 = 45$ Па, $P'_{c2} = 135 - 45 = 90$ Па, $P'_{c1} \neq P'_{c2}$. Следовательно, баланс давления в точке слияния потоков нарушен. Сказанное относится и к случаю регулирования любого числа параллельно работающих нагнетателей.

II. Регулирование при последовательной работе нагнетателей

Так как при последовательной работе соблюдается равенство расходов всех нагнетателей, то при изменении характеристики одного нагнетателя при частотном регулировании изменяется в сторону уменьшения производительность всех нагнетателей.

Следовательно, при любом способе регулирования при последовательной работе увеличение нагрузки на электродвигатель не произойдет. Однако при частотном регулировании только некоторых из нагнетателей может оказаться нецелесообразной работа, по крайней мере, одного из регулируемых нагнетателей: создаваемое им давление будет существенно меньше суммы давлений остальных нагнетателей. Поэтому при наличии нескольких последовательно работающих нагнетателей наивыгоднейший вариант частотного регулирования можно найти только на основе сравнительного анализа.

III. Регулирование при смешанной схеме работы нагнетателей

Особенности регулирования для данного случая рассмотрим на примере схемы, изображенной на рис. 4.

Описанная выше специфика регулирования параллельно работающих нагнетателей относится и к данному случаю (нагнетатели 1 и 2).

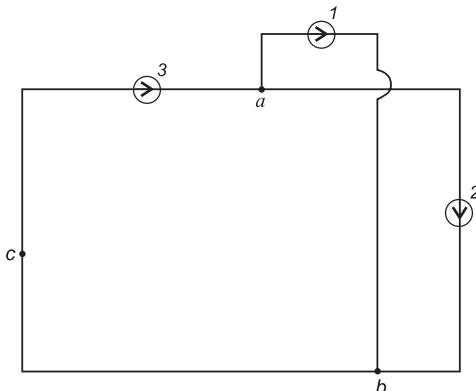


Рис. 4

Частотное регулирование нагнетателей 1 и 2 возможно лишь при одинаковой степени регулирования.

Анализ работы нагнетателя 3 приведен на рис. 5.

В расчетном режиме этот нагнетатель создает расход $L_3 = L_1 + L_2$ и давление P_3 . Часть давления P_2 идет на компенсацию потери давления на участке P_{bca} , а разница $P_3 - P_2$ расходуется на участках a_1b и a_2b .

$$P_3 - P_2 = \Delta P_{a1b} - P_{h1} = \Delta P_{a2b} - P_{h2}.$$

Здесь ΔP_{a1b} , ΔP_{a2b} — потери давления на соответствующих участках.

При уменьшении расхода за счет регулирования до величины L'_3 потери давления на участке bca уменьшаются (точка 4). В соответствии с характеристикой давления нагнетателя 3 возрастет до величины P_1 . Поэтому при регулировании нагнетателей 1 и 2 необходимо одновременное регулирование и нагнетателя 3 с тем, чтобы уменьшить его давление до величины P_5 .

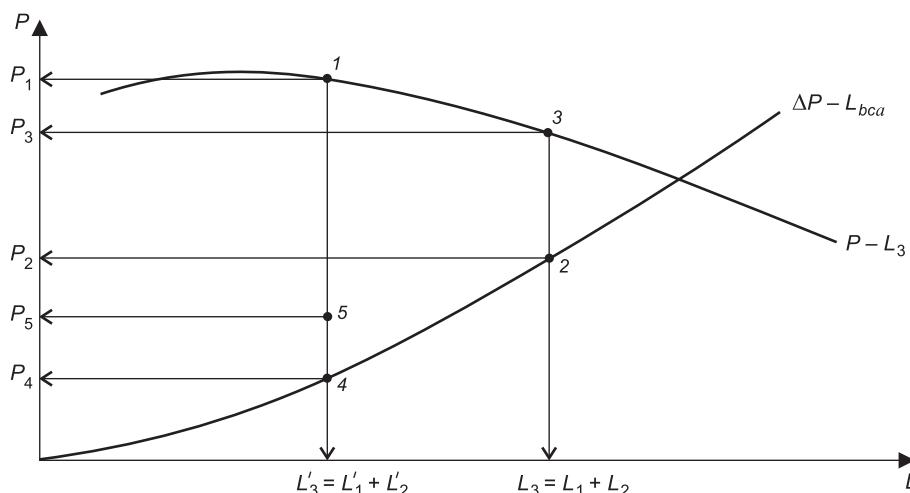


Рис. 5. Регулирование при смешанной схеме работы

$$P_5 = P_4 + \Delta P_{a'1b} - P_{h'1} = P_4 + \Delta P_{a'2b} - P_{h'2}.$$

Здесь со штрихом обозначены давления нагнетателей и потери давления на участках после регулирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вахвахов, Г.Г. Энергосбережение и надежность вентиляторных установок [Текст] / Г.Г. Вахвахов. — М. : Стройиздат, 1989. — 176 с.
2. Поляков, В.В. Насосы и вентиляторы: учеб. пособие для вузов по специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция» [Текст] / В.В. Поляков, Л.С. Скворцов. — М. : Стройиздат, 1990. — 336 с.

*КОСТИН Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Получено 02.05.12

Kostin Vladimir Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

REGULATION OF OPERATION OF PUMPS AND VENTILATORS AT COLLABORATION

The analysis of features of regulation of pumps and ventilators is provided at collaboration. Need of verifying calculation is show.

Key words: pumps, ventilators, collaboration, regulation.

REFERENCES

1. Vahvakov, G.G. Energy saving and reliability of ventilators installations [Text] / G.G. Vahvakov. — M. : Stroyizdat, 1989. — 176 p.
 2. Polyakov, V.V. Pumps and ventilators : the manual for higher education institutions in the specialty «Heat gas supply and ventilation» [Text] / V.V. Polyakov, L.S. Skvortsov. — M. : Stroyizdat, 1990. — 336 p.
-

УДК 697.34:697.444

Т.А. РАФАЛЬСКАЯ

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ ПУНКТОВ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОГО ГРАФИКА ЦЕНТРАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Рассчитаны переменные режимы теплового пункта при повышенном графике центрального регулирования и различных способах местного регулирования. Показано, что в течение всего отопительного периода завышена температура обратной воды в тепловой сети, температура внутреннего воздуха отапливаемых помещений ниже требуемой. Предложено установить программируемый регулятор расхода после подогревателя горячего водоснабжения второй ступени, рассчитаны переменные режимы работы теплового пункта с программируемым регулятором.

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

1. Особенности работы теплового пункта при повышенном температурном графике. Сокращение расхода воды в тепловой сети, используемого на обеспечение горячего водоснабжения (ГВС), достигается следующими способами:

1) применением схем включения подогревателей ГВС, в которых для предварительного подогрева водопроводной воды используется теплота обратной магистрали (последовательная и двухступенчатая смешанная схемы присоединения подогревателей ГВС);

2) ограничением максимального расхода сетевой воды на ввод теплового пункта (ТП);

3) центральным регулированием по совместной нагрузке отопления и ГВС (повышенный температурный график), что обеспечивает постоянный расход воды в теплосети и повышает гидравлическую устойчивость системы теплоснабжения.

При повышенном температурном графике в системе поддерживается постоянный расход сетевой воды, равный расчетному расходу на отопление. Для обеспечения нагрузки ГВС подогрев воды на ТЭЦ производится до температуры более высокой, чем по отопительному графику.

Присоединение подогревателей ГВС при повышенном графике центрального регулирования должно выполняться по двухступенчатой последовательной схеме или по смешанной схеме с ограничением расхода. Согласно СП 41-101-95, расчет площади подогревателей ГВС и определение их характеристик в точке излома температурного графика для этих схем производится аналогично. Однако работа этих схем во всем диапазоне наружных температур имеет существенные отличия:

— в последовательной схеме сетевая вода остывает во II ступени подогревателя и поступает в систему отопления с температурой согласно отопительному графику или близкой к ней; в смешанной схеме вода из II ступени подогревателя поступает в I ступень, а в систему отопления — вода с повышенной температурой из тепловой сети;

— в последовательной схеме поддерживается постоянный расход сетевой воды для системы отопления; в смешанной — переменный, в зависимости от нагрузки ГВС, покрываемой II ступенью подогревателя. Гидравлическая устойчивость системы отопления поддерживается работой смесительных насосов, подмешивающих воду из обратной магистрали;

— II ступень подогревателя рассчитывается на пропуск всего отопительного расхода при максимальном водоразборе, что позволяет значительно уменьшить площадь подогревателя II ступени. В последовательной схеме в систему отопления поступает вода с температурой выше или равной температуре в обратной магистрали. В смешанной схеме в этих условиях происходит значительное уменьшение расхода сетевой воды для системы отопления как за счет ограничения расхода воды в тепловых сетях, так и вследствие уменьшенной площади подогревателя. В случае водоразбора выше среднего это может привести к преждевременному отключению системы отопления от тепловой сети и остыванию помещений.

2. Расчет переменных режимов теплового пункта. Современные ТП представляют собой систему взаимосвязанных теплообменников. Для двухступенчатой смешанной схемы присоединения подогревателей ГВС при ограничении расхода сетевой воды на ввод ТП основную сложность представляет то, что если через теплообменник ГВС нижней ступени всегда проходит постоянный расход сетевой воды, то через верхнюю ступень расход переменный от максимального до циркуляционного в зависимости от переменного суточного водоразбора. Кроме того, в течение отопительного периода режимы работы ТП также существенно меняются. Поэтому рассчитывать эту схему ТП только для 2–3 значений наружной температуры нерационально, поскольку приводит к потерям тепловой энергии.

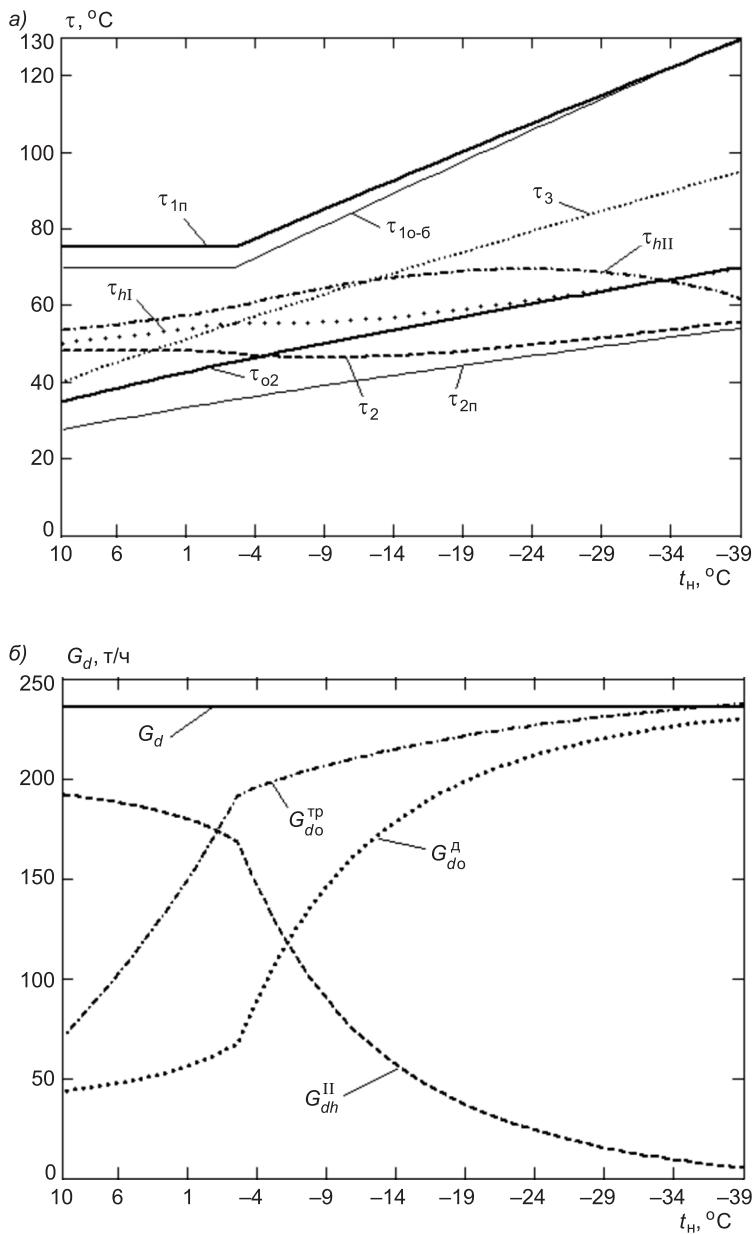
В [1] автором была предложена новая методика расчета переменных режимов. Методика позволяет рассчитать переменные режимы ТП при любой температуре наружного воздуха и различных нагрузках ТП.

Рассмотрим применение предложенной методики для случая повышенного графика центрального регулирования тепловой нагрузки.

В качестве примера приведены результаты расчета режимов центрального теплового пункта, расположенного в г. Осинники Кемеровской области. Расчет производился в связи с реконструкцией системы теплоснабжения вследствие подключения тепловых сетей к Южно-Кузбасской ГРЭС (г. Калтан) и ликвидацией небольших квартальных котельных. ЦТП обслуживает два жилых квартала с общей численностью 10 060 чел. Потребителями тепла являются жилые дома, общественные и административные здания. На Южно-Кузбасской ГРЭС принят температурный график 130–70 °C; квартальные тепловые сети и системы отопления зданий рассчитаны на температурный перепад 95–70 °C. Температура наружного воздуха для проектирования отопления $t_{ho} = -39$ °C, расчетная температура внутреннего воздуха $t_b^P = 20$ °C.

Расчетные характеристики ЦТП приняты по проектным данным:
максимальный часовой расход воды на ГВС, $q_{hr}^h = 113,956 \text{ м}^3/\text{ч}$;
расход на ГВС в средние сутки, $q_{tm}^h = 50,3 \text{ м}^3/\text{ч}$;
максимальный расход тепла на отопление, $Q_{o\ max} = 16\ 446 \text{ кВт}$;
максимальный расход тепла на вентиляцию, $Q_v\ max = 1556,5 \text{ кВт}$;
коэффициент теплопотерь $K^t = 0,35$;
температура водопроводной воды, $t_c = 5$ °C;
температура горячей воды, $t_h = 60$ °C.

Результаты расчета переменных режимов ТП в течение отопительного периода для случая максимального водоразбора в системе ГВС представлены на рис. 1.



На рис. 1, а видно, что температура воды, возвращаемой в тепловую сеть τ_2 на протяжении всего отопительного периода, выше требуемой по расчету повышенного графика, рассчитанного по СП 41-101-95, применимого для последовательной схемы. Известно, что высокая температура обратной воды — это прежде всего потери тепловой энергии. Согласно ПТЭ тепловых энергоустановок, п. 6.2.59, отклонение среднесуточного завышения τ_2 не должно превышать 5 %. Завышение τ_2 влечет за собой аварийный режим в работе турбин на ТЭЦ. При теплоснабжении от котельных превышение τ_2 также наносит ощутимый ущерб источнику теплоты, поскольку это перерасход водопроводной воды и пережог электроэнергии. В результате покрывать убытки источника приходится потребителям.

В то же время потребители недополучают теплоту. Как видно из рис. 1, б, расход сетевой воды, поступающей в систему отопления G_{do}^A , меньше требуемого G_{do}^{tp} для поддержания температурного режима системы отопления

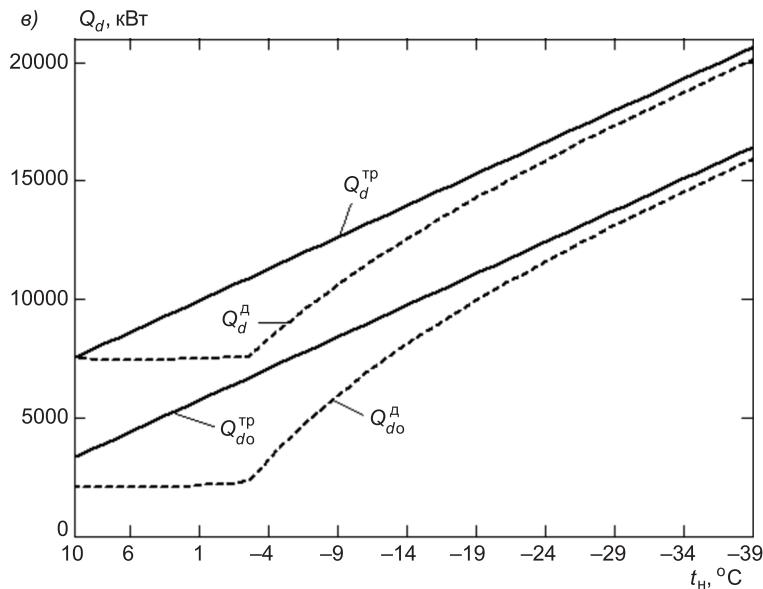


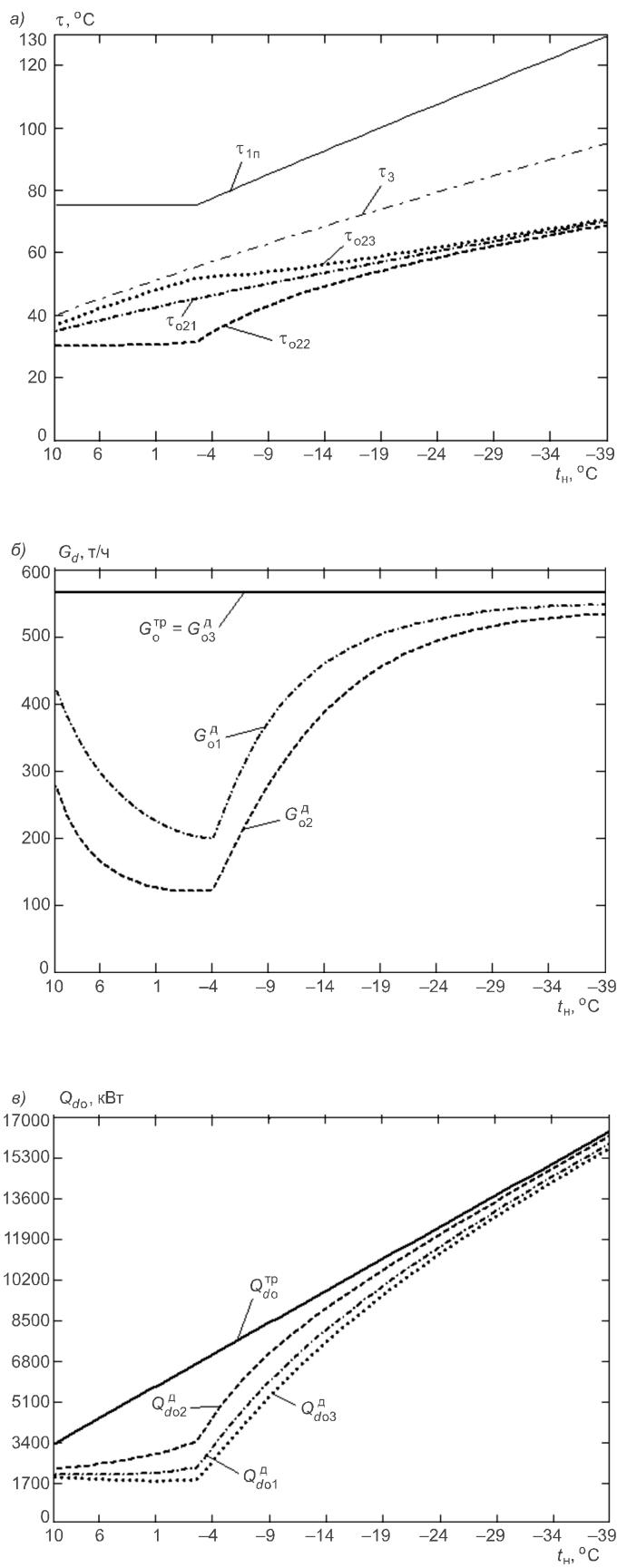
Рис. 1. Режимы ТП при повышенном графике центрального регулирования

а — температуры сетевой воды: τ_{1n} — температура в подающей магистрали теплосети по повышенному температурному графику; τ_{1o-6} — то же, при отопительно-бытовом графике; τ_3 — температура воды в подающей магистрали квартальных отопительных сетей; τ_{o2} — то же, в обратной магистрали; τ_2 — температура в обратной магистрали теплосети; τ_{2n} — то же, требуемая по расчету повышенного графика; τ_h^I — температура сетевой воды после подогревателя ГВС I (нижней) ступени; τ_h^{II} — то же, после II (верхней) ступени; б — расходы сетевой воды: G_d — суммарный расход сетевой воды; G_{do}^{tp} — требуемый расход воды из сети для системы отопления; G_{do}^d — действительный расход воды из сети, поступающей в систему отопления; G_{dh}^{II} — расход сетевой воды, необходимой для нагрева водопроводной воды в подогревателе ГВС II ступени; в — тепловая мощность: Q_d^{tp} — требуемая тепловая мощность тепловой сети; Q_d^d — действительная тепловая мощность тепловой сети; Q_{do}^{tp} — требуемая тепловая мощность системы отопления; Q_{do}^d — действительная тепловая мощность системы отопления

на протяжении всего отопительного периода, поскольку в первую очередь обеспечивается теплом ГВС. При смешанной схеме присоединения в силу меньшего сопротивления подогревателей II ступени по сравнению с отопительной внутриводной сетью, нагрев воды в системе ГВС до заданной температуры при дефиците тепла будет происходить за счет сокращения расхода теплоносителя в систему отопления, что также отмечается в [2]. Особенno сильно сокращение расхода сетевой воды происходит при наружных температурах выше точки излома температурного графика.

Потери теплоты хорошо видны на рис. 1, в, где рассчитаны требуемое количество теплоты, которое должны обеспечить тепловые сети Q_d^{tp} , и действительное Q_d^d , получаемое потребителями. Видно, что на протяжении всего отопительного периода потребители недополучают теплоту за счет уменьшения теплового потока в систему отопления Q_{do}^d по сравнению с требуемым Q_{do}^{tp} .

3. Способы местного количественного регулирования. Только центральное регулирование тепловой нагрузки не может обеспечить допустимых значений температуры внутреннего воздуха t_v и расхода воды, циркулирующей в системе отопления G_o в результате связанной подачи тепла на отопление и ГВС. Рассмотрим некоторые способы местного количественного регулирования отопительных систем. Результаты расчета приведены на рис. 2.



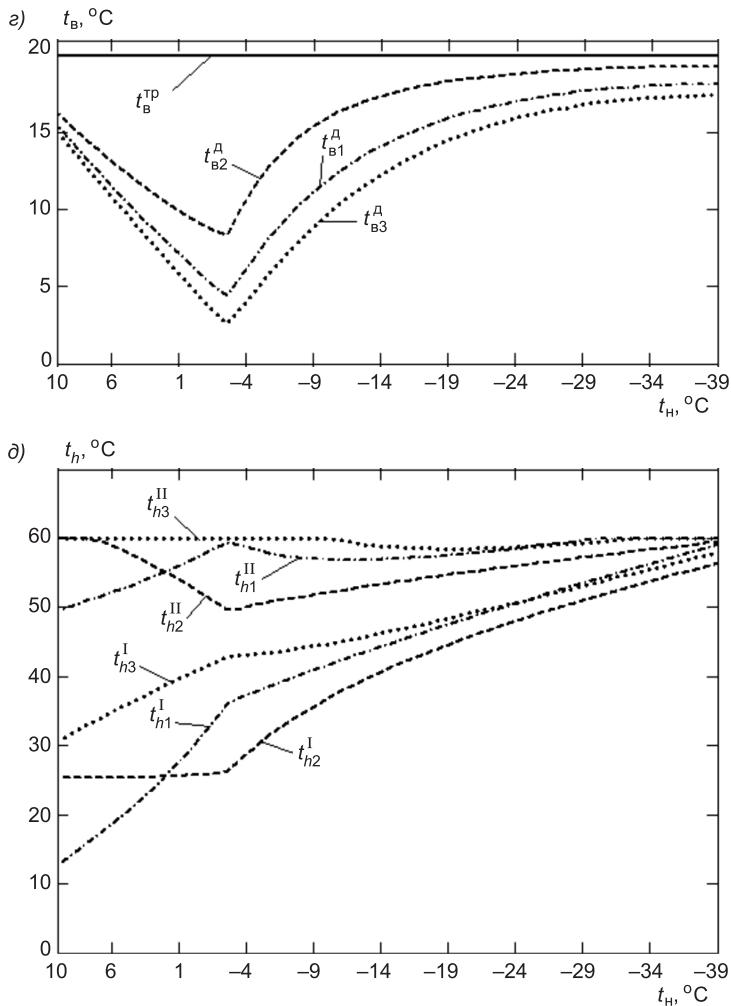
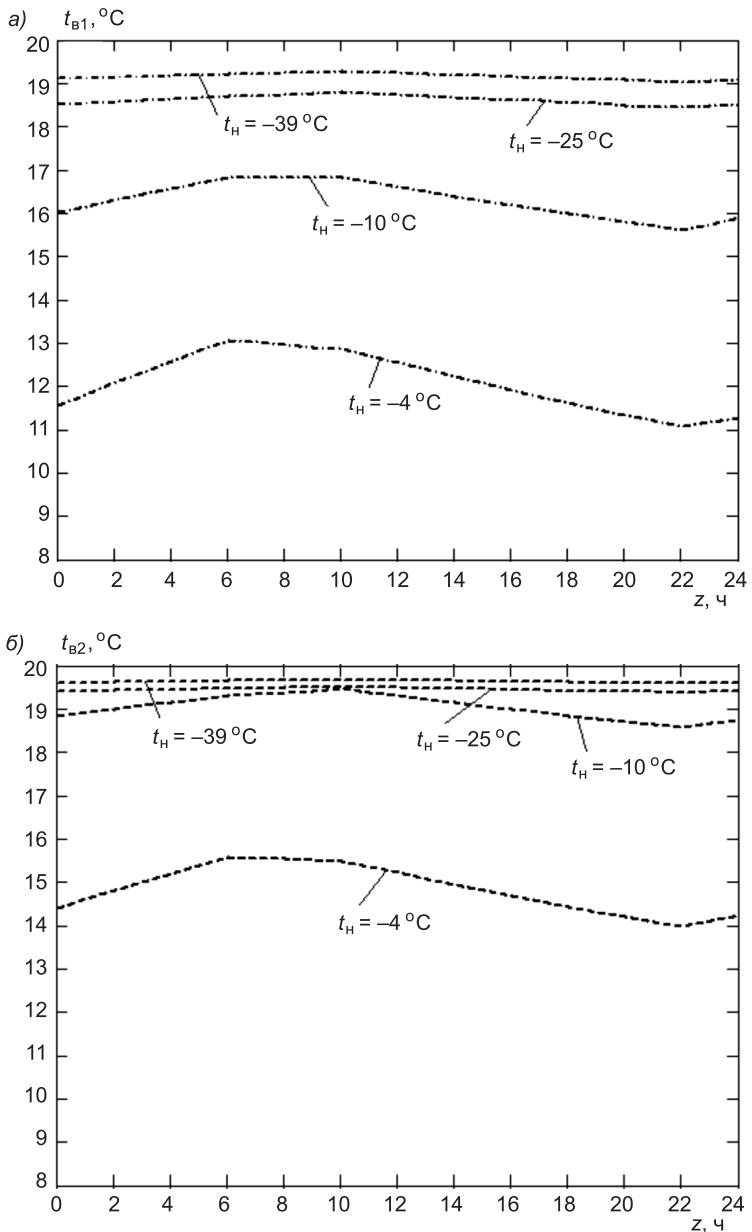


Рис. 2. Переменные режимы ТП при различных способах местного количественного регулирования

а — температура воды в обратной магистрали системы отопления: τ_{1n} , τ_3 — см. обозначения к рис. 1, *а*; τ_{o21} , τ_{o22} , τ_{o23} — температура воды в обратной магистрали системы отопления при способах регулирования 1–3 соответственно; *б* — расходы воды в системе отопления: G_o^{tp} — требуемый расход воды в системе отопления; G_{o1}^d , G_{o2}^d , G_{o3}^d — действительный расход воды в системе отопления при способах регулирования 1–3; *в* — тепловая мощность системы отопления: Q_{do}^{tp} — требуемая тепловая мощность системы отопления; Q_{do1}^d , Q_{do2}^d , Q_{do3}^d — действительная тепловая мощность системы отопления при способах регулирования 1–3; *г* — температура внутреннего воздуха: t_b^{tp} — требуемая температура внутреннего воздуха; t_{b1}^d , t_{b2}^d , t_{b3}^d — действительная температура внутреннего воздуха при способах регулирования 1–3; *д* — температура воды в системе ГВС: t_{h1}^I , t_{h2}^I , t_{h3}^I — температура нагреваемой воды после I ступени подогревателя ГВС при способах регулирования 1–3; t_{h1}^{II} , t_{h2}^{II} , t_{h3}^{II} — температура горячей воды, поступающей в систему ГВС после II ступени подогревателя при способах регулирования 1–3

1. *Местное регулирование поддержанием графика разности температур теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах системы отопления* $\Delta\tau = \tau_{o3} - \tau_{o2}$. Оно может осуществляться электронными регулирующими приборами Т48М-1, ЭРТ-1, РС29.2.33, РП-4Т. Это наиболее простой способ, так как в этом случае повышается точность регулирования из-за того, что график $\Delta\tau(t_h)$ линейный, в отличие от криволинейных графиков температур воды в подающем и обратном трубопроводах.



На рис. 2, а видно, что отопительный регулятор поддерживал требуемую разность температур $\Delta\tau = \tau_{o3} - \tau_{o21}$ в течение всего отопительного периода. Однако вследствие использования большого расхода сетевой воды в подогревателе ГВС II ступени в систему отопления поступало уменьшенное количество сетевой воды G_{o1}^d (рис. 2, б), следовательно, тепловая мощность системы отопления Q_{dol}^d (рис. 2, в) и температура внутреннего воздуха t_{B1}^d (рис. 2, г) ниже требуемых значений.

2. Регулирование поддержанием температуры воды в подающей магистрали отопительных сетей по сигналу датчика температуры внутреннего воздуха. Температура в обратной магистрали системы отопления τ_{o22} в этом случае будет ниже, чем в способе 1, ниже будет и температура воды, возвращаемой в тепловую сеть τ_{22} , т.е. сокращаются по-

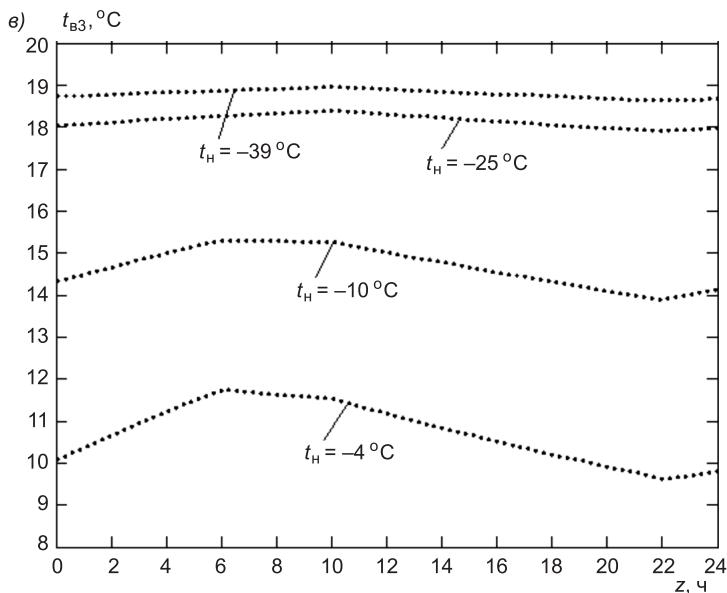


Рис. 3. Суточные режимы изменения температуры внутреннего воздуха при различных температурах наружного воздуха и различных способах местного регулирования

a — при регулировании по способу 1; *б* — при регулировании по способу 2;
в — при регулировании по способу 3

тери теплоты ($Q_{d02}^{\text{д}} > Q_{d01}^{\text{д}}$ на рис. 2, *в*). Но так как в этом случае регулирование производится за счет уменьшения коэффициента смешения, это вызывает еще большее снижение расхода воды в системе отопления $G_{o2}^{\text{д}}$ (см. рис. 2, *б*) и может привести к ее гидравлическому разрегулированию.

3. Регулирование поддержанием постоянного расхода воды в системе отопления. Этот режим осуществляется за счет увеличения коэффициента смешения; при этом повышается гидравлическая устойчивость системы отопления ($G_{o3}^{\text{д}} = G_{o\text{тр}}$ на рис. 2, *б*), однако тепловая мощность $Q_{d03}^{\text{д}}$ (рис. 2, *в*) и соответственно температура внутреннего воздуха $t_{B3}^{\text{д}}$ (рис. 2, *г*) самые низкие из всех способов местного регулирования.

На рис. 2, *д* показана температура нагреваемой воды после подогревателя I ступени t_h^I и поступающей в систему ГВС после II ступени t_h^{II} . При способе регулирования 3 в системе ГВС поддерживается температура воды на уровне 60 °C, при этом система отопления сохраняет гидравлическую устойчивость, но тепловой режим помещений наихудший, а также самые большие потери тепловой энергии. В способах 1 и 2 температура горячей воды может быть ниже 60 °C и возможна гидравлическая разрегулировка систем отопления.

Для уменьшения влияния водоразбора в системе ГВС на температурный режим помещений применяется, как правило, повышение теплоустойчивости зданий, иными словами, увеличивается толщина стен за счет применения эффективных утеплителей. Рассмотрим изменение температуры внутреннего воздуха в течение суток для здания с коэффициентом тепловой аккумуляции $\beta = 100$ ч при способах местного регулирования 1, 2, 3 и различных температурах наружного воздуха.

В рабочие дни наблюдаются два периода с увеличенным водоразбором продолжительностью 4 ч: утром с 6 до 10 ч с величиной расхода, в 1,5 раза превышающей средний показатель, и вечером с 18 до 22 ч с величиной расхода в 2 раза больше средней. Водоразбор, близкий к среднему, наблюдается в дневной период с 10 до 18 ч. С 0 до 6 ч водоразбор минимален и составляет 0–0,3 от среднего [2–4].

Действительную температуру внутреннего воздуха для каждого часа z в течение суток можно найти по формуле

$$t_{\text{в}}^{\Delta} = t_{\text{н}} + \left[\frac{Q_{\text{до}}^{\Delta}}{Q_{\text{до}}^{\text{TP}}} + \left(\frac{t_{\text{в}}^{\text{TP}} - t_{\text{н}}}{t_{\text{в}}^{\text{TP}} - t_{\text{н}}} - \frac{Q_{\text{до}}^{\Delta}}{Q_{\text{до}}^{\text{TP}}} \right) e^{-\frac{z}{\beta}} \right] (t_{\text{в}}^{\text{TP}} - t_{\text{н}}),$$

где $t_{\text{в}}^{\text{TP}}$ — текущая температура внутреннего воздуха.

Результаты расчета представлены на рис. 3.

Допустимый диапазон применения системы центрального регулирования определяется условием, по которому внутренняя температура в отапливаемых помещениях не должна выходить за пределы зоны комфорта (17–20 °C). Как показывают результаты расчета, при низких наружных температурах при всех способах местного регулирования среднесуточная внутренняя температура остается в пределах допустимой нормы хотя и ниже расчетной. При повышении наружной температуры при способе регулирования 2 (рис. 3, б) внутренняя температура также остается допустимой, а при способах 1 (рис. 3, а) и особенно 3 (рис. 3, в) внутренняя температура снижается. При любом способе регулирования при наружной температуре, соответствующей точке излома температурного графика центрального регулирования, внутренняя температура значительно ниже нормы, колебания внутренней температуры в течение суток превышают 3 °C. Наихудший температурный режим отапливаемых помещений наблюдается при способе регулирования 3 (рис. 3, в).

Таким образом, ни один из способов местного регулирования не может обеспечить оптимальный режим работы ТП. При повышении гидравлической устойчивости системы отопления ухудшается тепловой режим помещений и наоборот, т.е. режимы работы ТП с двухступенчатой смешанной схемой присоединений подогревателей ГВС не обеспечивают рациональное использование теплоты и приводят к ее потерям.

4. Двухступенчатая смешанная схема присоединения подогревателей ГВС с программируемым регулятором. Как показали расчеты, двухступенчатая смешанная схема присоединения подогревателей ГВС с ограничением расхода из сети не может обеспечить оптимальную работу систем отопления и ГВС без тепловых потерь. Также известно, что применение последовательной схемы часто вызывает «перетоп» помещений. Более рациональной является схема, в которой часть сетевой воды после подогревателя ГВС II ступени поступает в систему отопления, а часть — в подогреватель ГВС I ступени. Такой способ регулирования может быть реализован в типовой двухступенчатой смешанной схеме присоединения подогревателей ГВС с переключением на последовательную, где вместо трехходового клапана после подогревателя ГВС II ступени должен быть установлен программируемый регулятор расхода (ПР на рис. 4). Дополнительный расход сетевой воды, который должен поступать в систему отопления, можно определить по формуле

$$G_{\text{до}}^{\text{доп}} = \frac{\tau_{\text{Iп}} (G_{\text{до}} - G_{\text{до}}^{\Delta})}{\tau_{\text{hII}}} \cdot \frac{3,6}{c\rho}.$$

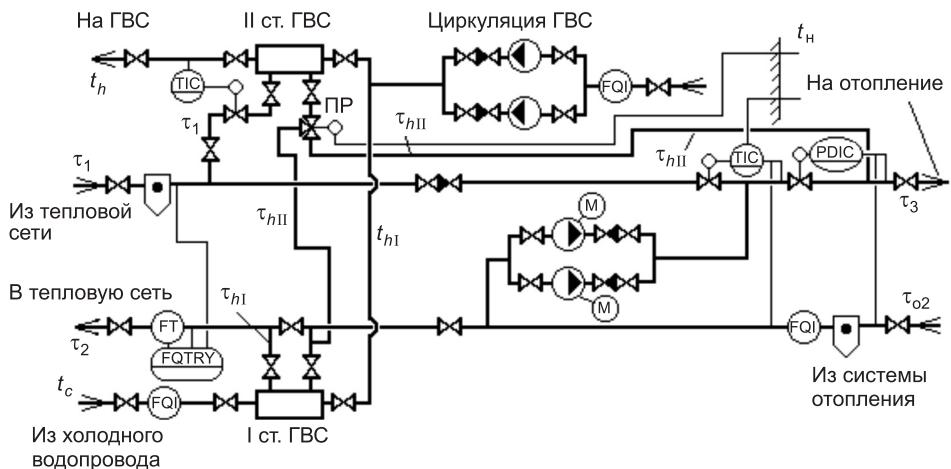
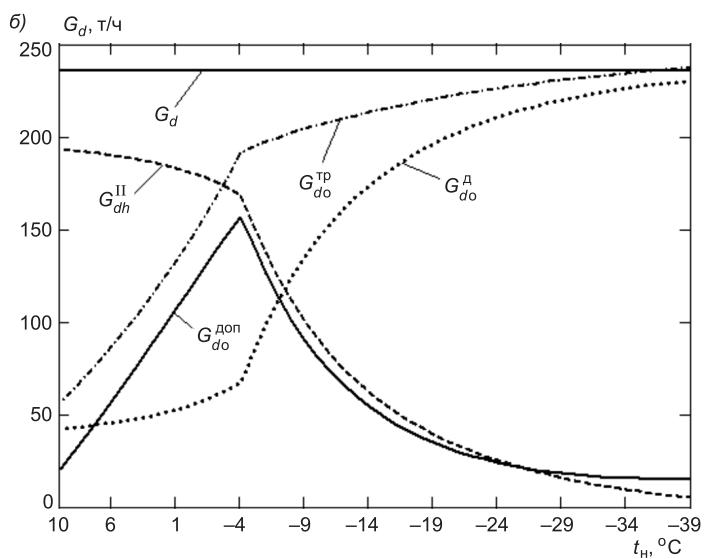
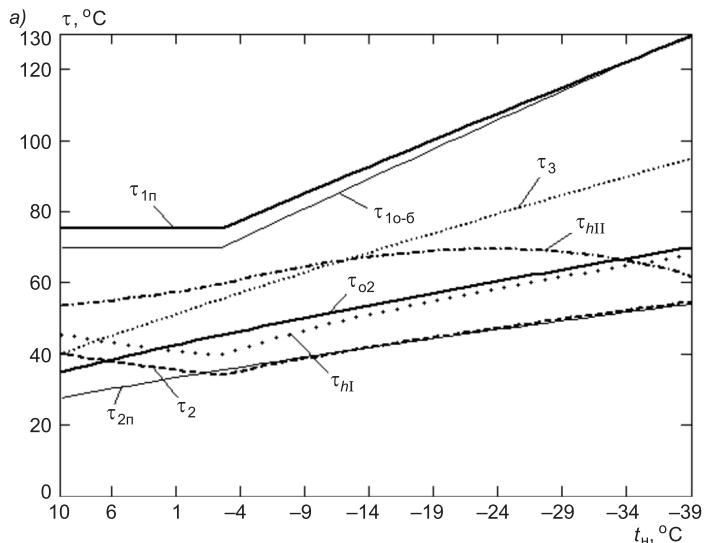


Рис. 4. Двухступенчатая последовательно-смешанная схема с переключением II ступени подогревателя ГВС

ПР – программируемый регулятор расхода



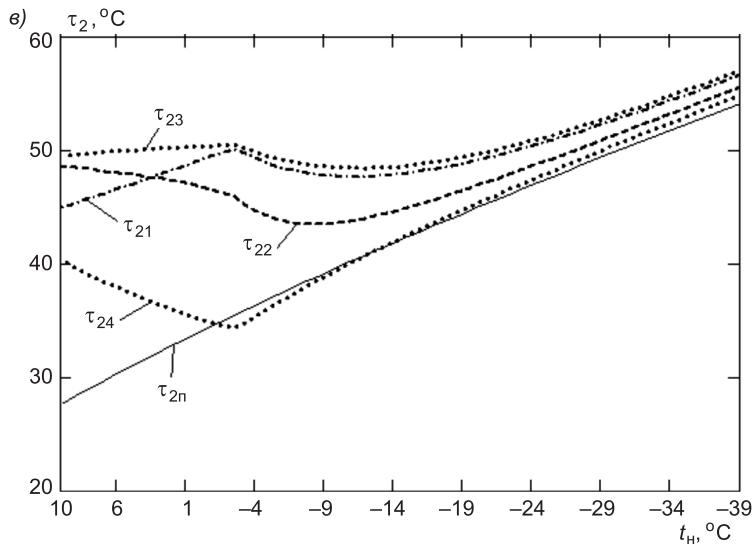


Рис. 5. Переменные режимы ТП для двухступенчатой последовательно-смешанной схемы с переключением II ступени подогревателя ГВС

a — температуры сетевой воды: $\tau_{1\text{п}}, \tau_{10-6}, \tau_3, \tau_{02}, \tau_2, \tau_{2\text{п}}, \tau_h^I, \tau_h^{II}$ см. обозначения к рис. 1, *a*; *b* — расходы сетевой воды: $G_d, G_{do}^{\text{тр}}, G_{do}^{\text{д}}; G_{dh}^{II}$ см. обозначения к рис. 1, *b*; $G_{do}^{\text{доп}}$ — дополнительный расход через регулятор температуры; *в* — температура воды, возвращаемой в тепловую сеть: $\tau_{21}, \tau_{22}, \tau_{23}$ — температура воды в обратной магистрали тепловой сети при способах регулирования 1–3; τ_{24} — температура воды в обратной магистрали тепловой сети ГВС; $\tau_{2\text{п}}$ — температура воды в обратной магистрали тепловой сети по расчету повышенного графика центрального регулирования

Результаты расчета режимов ТП с программируемым регулятором расхода приведены на рис. 5. На рис. 5, *a* видно, что температуры сетевой воды после подогревателя ГВС I ступени $\tau_{h\text{I}}$ и соответственно возвращаемой в тепловую сеть τ_2 ниже, чем в традиционной схеме, что сокращает потери теплоты. Дополнительный расход сетевой воды с $G_{do}^{\text{доп}}$ температурой $\tau_{h\text{II}}$, поступающий через программируемый регулятор, показан на рис. 5, *b*. На рис. 5, *в* для сравнения приведены температуры воды, возвращаемой в тепловую сеть при различных способах регулирования. Видно, что при применении программируемого регулятора температура возвращаемой воды τ_{24} в области низких температур практически совпадает с расчетной (теоретической) $\tau_{2\text{п}}$. В области высоких температур τ_{24} выше теоретической $\tau_{2\text{п}}$, однако остается ниже температуры возвращаемой воды в традиционной двухступенчатой смешанной схеме.

Выводы. 1. Рассмотрено применение предложенной автором методики расчета переменных режимов ТП, позволяющей определять тепловые и гидравлические режимы ТП не только в 2–3 «расчетных» точках, а при любых переменных условиях работы теплосети в течение отопительного периода для условий повышенного графика центрального регулирования.

2. Рассчитаны переменные режимы ТП с двухступенчатой схемой присоединения подогревателей ГВС и различных способах местного количественного регулирования. Сделан вывод, что при центральном регулировании по повышенному температурному графику не всегда удается обеспечить оптимальные параметры работы местных систем в ТП с двух-

ступенчатой смешанной схемой присоединения подогревателей ГВС. Действительная температура воды, возвращаемой в тепловую сеть τ_2 , не соответствует температуре, определенной при расчете повышенного графика без учета режимов ТП.

3. Исследованы режимы ТП с программируемым регулятором расхода. Применение программируемого регулятора позволит снизить потери теплоты и обеспечить оптимальный температурный режим для потребителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рафальская, Т.А. Методика расчета режимов двухступенчатой смешанной схемы подогревателей горячего водоснабжения с ограничением расхода [Текст] / Т.А. Рафальская // Изв. вузов. Строительство. — 2002. — № 3. — С. 73–78.
2. Ливчак, В.И. О температурном графике отпуска тепла микрорайонам [Текст] / В.И. Ливчак // Жилищное строительство. — 1975. — № 11. — С. 10–11.
3. Соколов, Е.Я. Центральное регулирование современных городских систем теплоснабжения [Текст] / Е.Я. Соколов // Электрические станции. — 1963. — № 10. — С. 23–30.
4. Зингер, Н.М. Выбор оптимального режима отпуска тепла от ТЭЦ [Текст] / Н.М. Зингер, А.И. Миркина // Электрические станции. — 1978. — № 5. — С. 14–18.

РАФАЛЬСКАЯ Татьяна Анатольевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: rta2009@yandex.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 20.06.12

Rafalskaya Tatyana Anatolevna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: rta2009@yandex.ru, Novosibirsk State University of Architectural and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

VARIABLE OPERATING MODES OF HEATING POINT AT THE RAISED TEMPERATURE SCHEDULE OF THE CENTRAL REGULATION OF HEATING LOADING

Variable modes of heating point are calculated at the raised schedule of the central regulation and various ways of local regulation. It is shown, that during all heating period the temperature of return water in a heat supply network, temperature of internal air of heated premises below demanded is overestimated. It is offered to install a programmed regulator of the charge after a heater of hot water supply of the second step, variable operating modes of heating point with a programmed regulator are calculated.

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

REFERENCES

1. Rafalskaya, T.A. Design procedure of modes of the two-level mixed scheme of heaters of hot water supply with restriction of the charge [Text] / T.A. Rafalskaya // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2002. — N 3. — P. 73–78.
2. Livchak, V.I. About the temperature schedule of holiday of heat to microdistricts [Text] / V.I. Livchak // Housing construction. — 1975. — N 11. — P. 10–11.
3. Sokolov, E.Ya. Central regulation of modern city systems of a heat supply [Text] / E.Ya. Sokolov // Power plants. — 1963. — N 10. — P. 23–30.
4. Zinger, N.M. Choice of an optimum mode of holiday of heat from thermal power station [Text] / N.M. Zinger, A.I. Mirkina // Power plants. — 1978. — N 5. — P. 14–18.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.542.001

Д.Э. АБРАМЕНКОВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ, А.В. ГРУЗИН,
Е.И. КРУТИКОВ, Д.А. ПОПОВ, А.С. МЕЛЬНИКОВА

ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ БЕСКЛАПАННЫХ ПНЕВМОУДАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ С НЕПОДВИЖНЫМ СТЕРЖНЕМ И ИХ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Рассмотрены физико-математические описания пневмоударных механизмов с воздухоподводящей трубкой и неподвижным стержнем в системе воздухораспределения.

Ключевые слова: пневмоударный механизм, стержень неподвижный, камера рабочего хода, камера сетевого давления, ударник, трубка воздухоподвода.

Данная работа является логическим продолжением аналитического обзора пневмоударных механизмов бесклапанного типа [1].

От ранее рассмотренных механизмов такого типа [2, 3] представленные механизмы отличаются наличием неподвижного стержня, размещенного в теле ударника и жестко закрепленного относительно хвостовика рабочего инструмента. Конструктивное решение пневмоударного механизма может оказаться положительным для машин тяжелого типа, например, свайных молотов или трамбующих машин. Физико-математическое описание предлагаемых конструктивных решений и моделирование их рабочих процессов с целью установления рациональных геометрических соотношений для достижения высоких значений энергетических параметров представляется целесообразным. Выполнение комплекса исследований содержит четыре этапа, которые можно представить в следующей последовательности.

В настоящей статье предусматривается осуществление первого этапа: физико-математического описания рабочего процесса, принятие и обоснование допущений и ограничений с разработкой систем уравнений, достаточных для реализации последующего второго этапа: составления алгоритма и программы с ее отладкой. При достижении адекватности физико-математической и физической моделей может быть осуществлен третий этап: исследование взаимозависимостей между геометрическими и энергетическими параметрами и выбор рациональных соотношений между ними. Заключительным четвертым этапом является разработка инженерной методики расчета пневмоударного механизма на заданные энергетические параметры с рекомендациями по

© Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Грузин А.В., Крутиков Е.И., Попов Д.А.,
Мельникова А.С., 2012

применению коэффициентов пропорциональности для основных геометрических параметров.

Принципиальные схемы механизмов пневматических молотов. Краткое описание устройства и рабочего процесса пневмоударного механизма [4].

Сжатый воздух из сети по каналу А₁А трубы 1 поступает в камеру Б сетевого давления (она же камера холостого хода), расположенную в ударнике 2 и ограниченную стержнем 3 инструмента 4, откуда в зависимости от положения ударника по впускному каналу В₁В в управляемую камеру Г рабочего хода.

Кольцевая камера Д атмосферного давления со стороны ступени инструмента постоянно сообщена с окружающим пространством через выпускной канал Е.

Камера Г периодически опорожняется через выпускной канал Ж в корпусе 5.

Под действием разности силовых импульсов со стороны камер Е, Б и Г ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по инструменту.

Недостатками данного механизма в зависимости от применения в машинах ударного действия тяжелого типа могут быть: значительные силы трения между корпусом и ударником, ударником и трубкой, ударником и удлиненным хвостовиком (стержнем), тормозящие движение ударника, с потерей кинетической энергии и частоты ударов; возможные поломки стержня 3 в сопряжении с хвостовиком инструмента 4 и трубы 1 в креплении относительно корпуса 5 или на посадочном участке ударника 2; наличие камеры Д атмосферного давления воздуха, не участвующей в создании силового импульса холостого хода и потенциально исключаемой из рабочего процесса.

Положительные свойства конструктивного решения [4] заключаются в следующих элементах: предельно простые решения каналов выпуска с минимально возможными значениями местных сопротивлений выпускных каналов; постоянное поджатие рабочего инструмента к обрабатываемой среде посредством давления воздуха со стороны камеры Б на торцевую поверхность стержня 3; минимально возможные значения местных сопротивлений воздуха, подаваемого в камеру Б по каналу трубы 1 из сети сжатого воздуха.

Расчетная схема пневмоударного механизма [4], представленная на рис. 2, соответствует конструктивной схеме рис. 1.

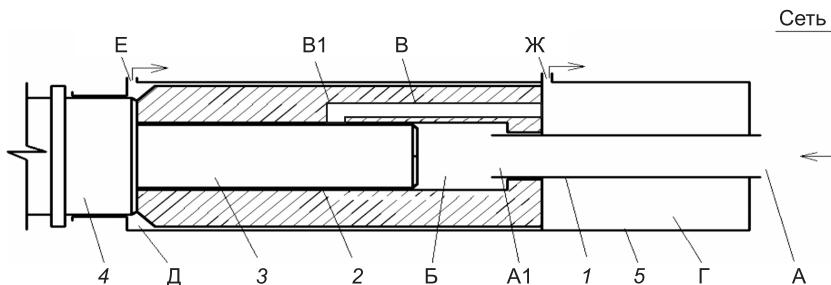


Рис. 1. Принципиальная схема пневмоударного механизма [4]

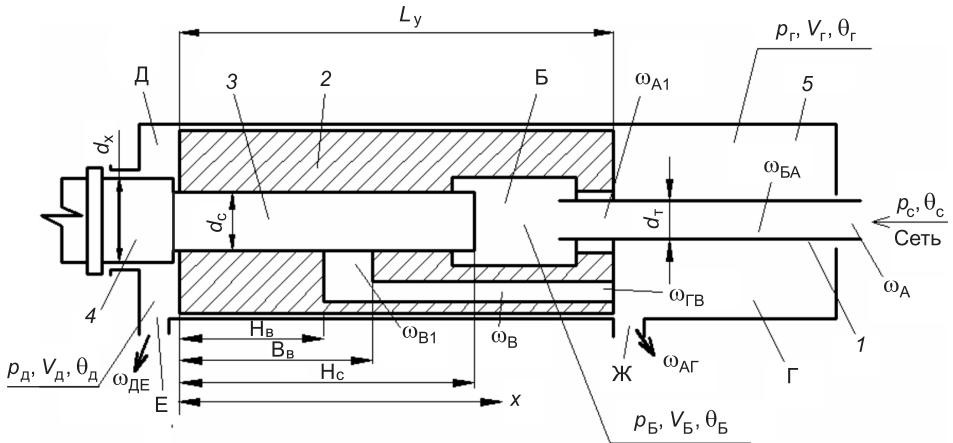


Рис. 2. Расчетная схема механизма [4]

Физико-математическое описание рабочего процесса пневмоударного механизма [4] имеет следующий вид:

бародинамическая составляющая —

$$\begin{cases} \frac{dp_{\Delta}}{dt} = \frac{k}{V_{\Delta} + x_y(S_y - S_c)} \left[W \left(\omega_{\text{ED}} \varphi_{\text{ED}} - p_{\Delta} \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_c) \right) \right], \\ \frac{dp_B}{dt} = \frac{k}{V_B + x_y(S_c - S_T)} \left[W (\omega_{BA} \varphi_{BA} - \omega_{\Gamma B} (x_y) \varphi_{\Gamma B}) - \right. \\ \left. - p_B \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_c - S_T) \right], \\ \frac{dp_{\Gamma}}{dt} = \frac{k}{V_{\Gamma} - x_y(S_y - S_T)} \left[W (\omega_{\Gamma B} (x_y) \varphi_{\Gamma B} - \omega_{JK} (x_y) \varphi_{JK}) + \right. \\ \left. + p_{\Gamma} \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_T) \right]; \end{cases} \quad (1)$$

термодинамическая составляющая —

$$\begin{cases} \frac{d\theta_{\Delta}}{dt} = \frac{\theta_{\Delta}}{p_{\Delta}(V_{\Delta} + x_y(S_y - S_c))} \left[W \left(\omega_{\text{ED}} \varphi_{\text{ED}} \Omega_{\text{ED}} - (k-1)p_{\Delta} \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_c) \right) \right], \\ \frac{d\theta_{\text{B}}}{dt} = \frac{\theta_{\text{B}}}{p_{\text{B}}(V_{\text{B}} + x_y(S_c - S_T))} \left[W (\omega_{\text{BA}} \varphi_{\text{BA}} \Omega_{\text{BA}} - \omega_{\text{FB}}(x_y) \varphi_{\text{FB}} \Omega_{\text{FB}}) - \right. \\ \left. -(k-1)p_{\text{B}} \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_c - S_T) \right], \\ \frac{d\theta_{\Gamma}}{dt} = \frac{\theta_{\Gamma}}{p_{\Gamma}(V_{\Gamma} - x_y(S_y - S_T))} \left[W (\omega_{\text{FB}}(x_y) \varphi_{\text{FB}} \Omega_{\text{FB}} - \omega_{\text{JK}}(x_y) \varphi_{\text{JK}} \Omega_{\text{JK}}) + \right. \\ \left. +(k-1)p_{\Gamma} \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_T) \right]; \end{cases} \quad (2)$$

баромеханическая составляющая —

$$\begin{cases} \frac{d^2 x_y}{dt^2} = \frac{p_{\Delta}(S_y - S_c) + p_B(S_c - S_T) - p_{\Gamma}(S_y - S_T)}{m_y} & \text{при } x_y > 0, \\ \left(\frac{dx_y}{dt} \right)_0 = -k_y \left(\frac{dx_y}{dt} \right)_y & \text{при } x_y \leq 0, \\ \frac{d^2 x_k}{dt^2} = \frac{p_{\Delta}(S_y - S_c) + p_B(S_c - S_T) - p_{\Gamma}(S_y - S_T) - F_h}{m_k} & \text{при } x_k > 0, \\ \left(\frac{dx_k}{dt} \right)_0 = -k_k \left(\frac{dx_k}{dt} \right)_y & \text{при } x_k \leq 0. \end{cases} \quad (3)$$

В качестве геометрических ограничений можно представить следующие (см. рис. 1, 2):

$$d_T < d_c < d_x; H_c > B_B > H_B; x_y \leq H_c;$$

$$\omega_J > \omega_A \geq \omega_{A1}; \omega_E = \omega_J; \omega_{B1} \geq \omega_B.$$

Обозначения, приведенные в (1)–(3):

V_B, V_G, V_{Δ} — объемы камер сетевого давления (холостого хода), рабочего хода и атмосферного давления;

$p_A, p_{\Gamma}, p_{\Delta}, p_B$ — давления воздуха атмосферного, в камерах рабочего хода, атмосферного давления, сетевого давления (холостого хода);

$\omega_A, \omega_{\Gamma}, \omega_B, \omega_J, \omega_E$ — площади проходных сечений каналов (дросселей) впуска в камеру Б из сети, в камеру Г и выпуска воздуха в атмосферу;

$\varphi_A, \varphi_{\Gamma}, \varphi_B, \varphi_J, \varphi_E$ — бародинамические функции воздуха для пропуска через площади проходных сечений $\omega_A, \omega_{\Gamma}, \omega_B, \omega_J, \omega_E$;

$\theta_A, \theta_{\Gamma}, \theta_{\Delta}, \theta_B$ — температура воздуха сетевого, в камерах рабочего хода, атмосферного давления, сетевого давления (холостого хода);

$\theta_A, \theta_{\Gamma}, \theta_B, \theta_J, \theta_E$ — температура воздуха в каналах (дросселях) с площадями проходных сечений $\omega_A, \omega_{\Gamma}, \omega_B, \omega_J, \omega_E$;

$\Omega_A, \Omega_{\Gamma}, \Omega_{\Delta}, \Omega_B$ — термодинамические функции воздуха в камерах для давлений $p_A, p_{\Gamma}, p_{\Delta}, p_B$;

$\Omega_A, \Omega_{\Gamma}, \Omega_B, \Omega_J, \Omega_E$ — термодинамические функции воздуха в каналах с площадями проходных сечений $\omega_A, \omega_{\Gamma}, \omega_B, \omega_J, \omega_E$;

$$W = [2kR/(k - 1)]^{1/2},$$

где k — показатель процесса в рабочих камерах, R — газовая постоянная;

x_y, x_k — перемещение ударника и корпуса;

m_y, m_k — массы ударника и корпуса;

S_y, S_c — площади диаметральных сечений ударника, стержня;

F_h — усилие нажатия на корпус — цилиндр;

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

t — текущее время.

Рабочие площади со стороны камер Г, Δ и Б: $S_{\Gamma} = S_y, S_B = S_c - S_T, S_{\Delta} = S_y - S_c$.

Площади: S_Γ — диаметральное сечение ударника 2 со стороны корпуса 1 для камеры Г; S_B — для камеры Б проточной (холостого хода); S_D — для камеры Д атмосферного давления и удлиненного стержня 3, опертого на хвостовик инструмента 4 (см. рис. 1, 2).

Ограничения. В системе уравнений, описывающих рабочий процесс пневмоударного механизма рассматриваемого типа, процессы перетечек и утечек опущены. Возможные обратные течения учтены зависимостями (4) и (5). Согласно зависимостям Сен-Венана—Вантцеля функции имеют одинаковую форму записи и могут иметь вид:

$$\varphi_{ij} \equiv \varphi_{ji} = \begin{cases} 0,5283 > \frac{p_j}{p_i} & p_i \sqrt{\theta_i} \cdot 0,2588, \\ 0,5283 \leq \frac{p_j}{p_i} & p_i \sqrt{\theta_i} \cdot \sqrt{\left(\frac{p_j}{p_i}\right)^{2/k}} - \left(\frac{p_j}{p_i}\right)^{k+1/k}, \\ 0,5283 > \frac{p_j}{p_i} & -p_j \sqrt{\theta_j} \cdot 0,2588, \\ 0,5283 \leq \frac{p_j}{p_i} & -p_j \sqrt{\theta_j} \cdot \sqrt{\left(\frac{p_i}{p_j}\right)^{2/k}} - \left(\frac{p_i}{p_j}\right)^{k+1/k} \end{cases}, \quad (4)$$

где индексы ji и ij обозначают направления течения воздуха «откуда—куда» и «куда—откуда» при i — куда и j — откуда.

Аналогична запись для функций Ω :

$$\Omega_{ij} \equiv \Omega_{ji} = \begin{cases} \varphi_{ij} > 0 & (k-1), \\ \varphi_{ij} \leq 0 & k - \left(\frac{\theta_j}{\theta_i}\right), \\ \varphi_{ji} > 0 & k - \left(\frac{\theta_i}{\theta_j}\right), \\ \varphi_{ji} \leq 0 & (k-1). \end{cases} \quad (5)$$

При предварительном рассмотрении рабочих процессов пневмоударных механизмов, представленных схемами на рис. 1 и 2, приняты допущения возможности прямых и обратных течений воздуха по дросселям (каналам) при наличии соответствующих посадок между контактирующими подвижными деталями: ударник — корпус (цилиндр); ударник — стержень. Теоретический и практический интерес представляют рациональные значения соотношений между объемами камер, проходными сечениями дросселей (каналов) впуска-выпуска и их координаты расположения.

Краткое описание устройства и рабочего процесса пневмоударного механизма [5] по варианту 1 (рис. 3).

Сжатый воздух из сети по каналу А в трубке 1 поступает в камеру Б сечевого давления (она же камера холостого хода), образованную центральным каналом ударника 2 и удлиненным стержнем 3 инструмента 4, с которым он взаимодействует. Воздух из камеры Б в зависимости от положения ударника поступает по каналу ВВ₁ в управляемую камеру Г рабочего хода.

Опорожнение камеры Г осуществляется через канал-паз Д на боковой поверхности ударника, камеру Е атмосферного давления и выпускной канал Ж в корпусе 5.

Под действием разности силовых импульсов со стороны камер Е, Б и Г ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по инструменту.

Канал-паз Д₁Д может быть выполнен в виде лыски, а также под углом к образующей цилиндрической поверхности ударника.

В качестве положительных качеств механизма, выполненного по варианту 1 [5], отметим следующие: постоянное поджатие рабочего инструмента к обрабатываемой среде посредством давления воздуха со стороны камеры Б на торцевую поверхность стержня 3; минимально возможные значения местных сопротивлений воздуха, подаваемого в камеру Б по каналу трубы 1 из сети сжатия воздуха.

Недостатками данного механизма являются: значительные силы трения между корпусом и ударником, ударником и трубкой, ударником и удлиненным хвостовиком (стержнем) 3, размещенным в осевом глухом отверстии ударника 2; возможность поломки стержня в сопряжении с хвостовиком инструмента 4 и трубы 1 в креплении относительно корпуса 5 или на посадочном участке ударника 2; наличие камеры Е атмосферного давления воздуха, не участвующей в создании силового импульса холостого хода и потенциально исключаемой из рабочего процесса; наличие канала-паза Д₁Д, ослабляющего прочность рабочего сечения ударника; наличие увеличенного объема камеры Е, повышающей поперечный габаритный размер корпуса.

Расчетная схема варианта 1 [5] подобна схеме, представленной на рис. 2.

Физико-математическое описание рабочего процесса пневмоударного механизма [5] по варианту 1:

бародинамическая составляющая —

$$\begin{cases} \frac{dp_E}{dt} = \frac{k}{V_E + x_y(S_y - S_c)} \left[W(\omega_{JE}\varphi_{JE} + \omega_{ED}(x_y)\varphi_{ED}) - p_E \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_c) \right], \\ \frac{dp_B}{dt} = \frac{k}{V_B + x_y(S_c - S_T)} \left[W(\omega_{BA}\varphi_{BA} - \omega_{GB}(x_y)\varphi_{GB}) - p_B \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_c - S_T) \right], \\ \frac{dp_G}{dt} = \frac{k}{V_G - x_y(S_y - S_T)} \left[W(\omega_{GB}(x_y)\varphi_{GB} - \omega_{ED}(x_y)\varphi_{ED}) + p_G \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_T) \right]; \end{cases} \quad (6)$$

термодинамическая составляющая —

$$\begin{cases} \frac{d\theta_E}{dt} = \frac{\theta_E}{p_E(V_E + x_y(S_y - S_c))} \left[W(\omega_{JE}\varphi_{JE}\Omega_{JE} + \omega_{ED}(x_y)\varphi_{ED}\Omega_{ED}) - \right. \\ \left. -(k-1)p_E \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_c) \right], \\ \frac{d\theta_B}{dt} = \frac{\theta_B}{p_B(V_B + x_y(S_c - S_T))} \left[W(\omega_{BA}\varphi_{BA}\Omega_{BA} - \omega_{GB}(x_y)\varphi_{GB}\Omega_{GB}) - \right. \\ \left. -(k-1)p_B \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_c - S_T) \right], \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{d\theta_\Gamma}{dt} = \frac{\theta_\Gamma}{p_\Gamma(V_\Gamma - x_y(S_y - S_c))} \left[W(\omega_{\Gamma_B}(x_y)\varphi_{\Gamma_B}\Omega_{\Gamma_B} + \omega_{E_D}(x_y)\varphi_{E_D}\Omega_{E_D}) + \right. \\ \left. +(k-1)p_\Gamma \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_c) \right]; \end{cases} \quad (7)$$

баромеханическая составляющая —

$$\begin{cases} \frac{d^2x_y}{dt^2} = \frac{p_E(S_y - S_c) + p_B(S_c - S_T) - p_\Gamma(S_y - S_c)}{m_y} \text{ при } x_y > 0, \\ \left(\frac{dx_y}{dt} \right)_0 = -k_y \left(\frac{dx_y}{dt} \right)_y \text{ при } x_y \leq 0, \\ \frac{d^2x_k}{dt^2} = \frac{p_E(S_y - S_c) + p_B(S_c - S_T) - p_\Gamma(S_y - S_c) - F_h}{m_k} \text{ при } x_k > 0, \\ \left(\frac{dx_k}{dt} \right)_0 = -k_k \left(\frac{dx_k}{dt} \right)_y \text{ при } x_k \leq 0. \end{cases} \quad (8)$$

Обозначения в системах уравнений (6)–(8) и ограничения к ним подобны (1)–(5) и здесь в целях сокращения записи опускаются.

Краткое описание устройства и рабочего процесса пневмоударного механизма [5] по варианту 2.

Сжатый воздух из сети по каналу АА₁ в трубке 1 поступает в камеру Б сетевого давления (она же камера холостого хода), образованную центральным каналом ударника 2 и удлиненным неподвижным стержнем 3 инструмента 4, с которым он взаимодействует. Воздух из камеры Б в зависимости от положения ударника поступает по каналу ВВ₁ в управляемую камеру Г рабочего хода.

Опорожнение камеры Г осуществляется через винтовые каналы-пазы Д₁Д, чередующиеся с выступами 5 на ударнике, камеру Е атмосферного давления и выпускной канал Ж в корпусе 6.

Под действием разности силовых импульсов со стороны Е, Б и Г ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по инструменту.

Винтовые (наклонные) каналы-пазы Д могут быть выполнены на внутренней боковой поверхности корпуса.

Положительным качеством варианта 2 [5] является проведение наклонными или винтовыми каналами-пазами Д принудительной очистки внутренней боковой поверхности корпуса. Другие положительные качества аналогичны конструктивному варианту 1. Недостатки исполнения варианта 2 относятся к более сложной технологии изготовления наклонных или винтовых каналов-пазов Д, обладающих кроме того большими местными сопротивлениями в сравнении с прямыми каналами-пазами меньшей протяженности. Местные сопротивления наклонных или винтовых каналов-пазов могут быть по величине переменными из-за засорения их удалаемым материалом с боковых стенок корпуса, что может отрицательно сказаться на уменьшении коэффициента расхода и повлиять на устойчивость рабочего режима пневмоударного механизма.

Принципиальные схемы пневмоударных механизмов [5] на рис. 3 и 4 отличаются между собой конструктивным исполнением канала-паза выпуска отработавшего воздуха из камеры Г рабочего хода, выполненного

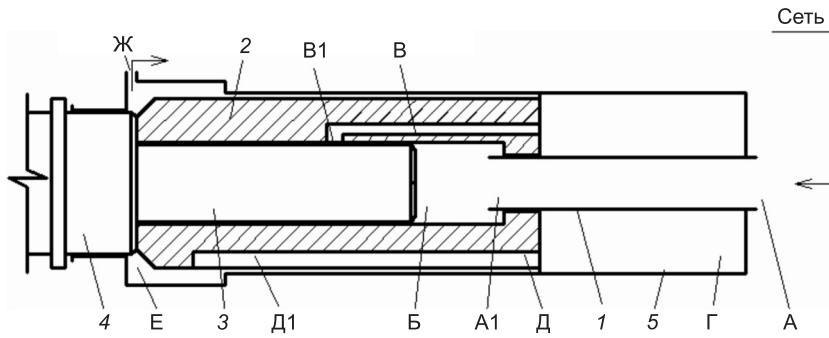


Рис. 3. Вариант 1 принципиальной схемы пневмоударного механизма [5]

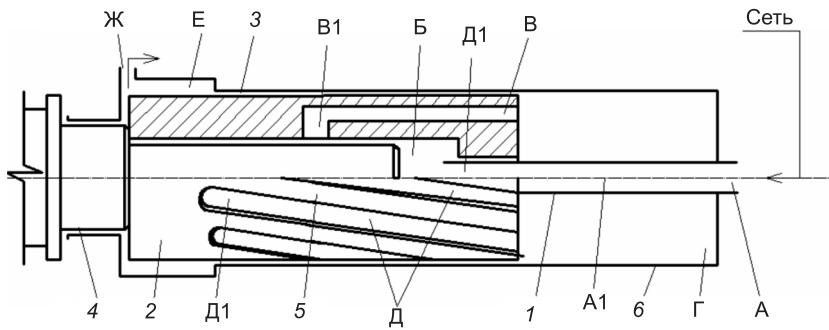


Рис. 4. Вариант 2 принципиальной схемы пневмоударного механизма [5]

под углом к образующей ударника. Исполнение канала-паза под углом позволяет увеличить его протяженность, повысить продольную жесткость и прочность. Отмеченное отличие практически не меняет форму и содержание уравнений, описывающих рабочий процесс обоих пневмоударных механизмов. Таким образом, не изменяются допущения и ограничения к физико-математической модели и описанию. В связи с этим для пневмоударного механизма, представленного на рис. 4, физико-математическое описание здесь опускается.

Краткое описание устройства и рабочего процесса пневмоударного механизма [5] по варианту 3 (рис. 5).

Сжатый воздух из сети по каналу А в трубке 1 поступает в камеру Б сетевого давления (она же камера холостого хода), образованную центральным каналом ударника 2 и торцом удлиненного неподвижного стержня 3 инструмента 4, с которым он взаимодействует. Воздух из ка-

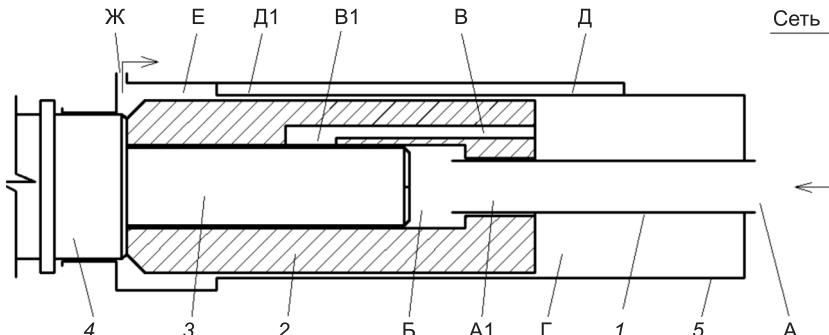


Рис. 5. Вариант 3 принципиальной схемы пневмоударного механизма [5]

меры Б поступает по каналу ВВ₁ в управляемую камеру рабочего хода в зависимости от положения ударника.

Опорожнение камеры Г осуществляется через продольный паз Д₁Д, выполненный на внутренней стороне цилиндра 5, камеру Е атмосферного давления и выпускной канал Ж в цилиндре со стороны инструмента.

Под действием разности силовых импульсов давления со стороны камер Б, Г и Е ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по инструменту.

Продольный паз может быть выполнен на внешней стороне цилиндра, стержень — отдельно от инструмента.

Положительные и отрицательные качества конструктивного варианта 3 [5] практически совпадают с вариантом 1. Однако положительным качеством варианта 3 следует считать большую прочность диаметрального сечения ударника, поскольку каналы-пазы конструктивно выполнены на боковой внутренней поверхности корпуса, которые менее подвержены воздействию колебательного процесса системы корпус-ударник.

Физико-математическое описание рабочего процесса пневмоударного механизма [5] по варианту 3:

бародинамическая составляющая —

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp_E}{dt} = \frac{k}{V_E + x_y(S_y - S_c)} \left[W \left(\omega_{JE} \varphi_{JE} + \omega_{EG} (x_y) \varphi_{EG} - p_E \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_c) \right) \right], \\ \frac{dp_B}{dt} = \frac{k}{V_B + x_y(S_c - S_T)} \left[W (\omega_{BA} \varphi_{BA} - \omega_{GB} (x_y) \varphi_{GB}) - p_B \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_c - S_T) \right], \\ \frac{dp_G}{dt} = \frac{k}{V_G - x_y(S_y - S_T)} \left[W (\omega_{GB} (x_y) \varphi_{GB} - \omega_{ED} (x_y) \varphi_{ED}) + p_G \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_T) \right]; \end{array} \right. \quad (9)$$

термодинамическая составляющая —

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_E}{dt} = \frac{\theta_E}{p_E (V_E + x_y(S_y - S_c))} \left[W \left(\omega_{JE} \varphi_{JE} \Omega_{JE} + \omega_{EG} (x_y) \varphi_{EG} \Omega_{EG} - \right. \right. \\ \left. \left. -(k-1)p_E \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_c) \right) \right], \\ \frac{d\theta_B}{dt} = \frac{\theta_B}{p_B (V_B + x_y(S_c - S_T))} \left[W (\omega_{BA} \varphi_{BA} \Omega_{BA} - \omega_{GB} (x_y) \varphi_{GB} \Omega_{GB}) - \right. \\ \left. \left. -(k-1)p_B \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_c - S_T) \right), \right. \\ \frac{d\theta_G}{dt} = \frac{\theta_G}{p_G (V_G - x_y(S_y - S_T))} \left[W (\omega_{GB} (x_y) \varphi_{GB} \Omega_{GB} + \omega_{ED} (x_y) \varphi_{ED} \Omega_{ED}) + \right. \\ \left. \left. +(k-1)p_G \left(\frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_T) \right]; \right. \end{array} \right. \quad (10)$$

баромеханическая составляющая —

$$\begin{cases} \frac{d^2x_y}{dt^2} = \frac{p_E(S_y - S_c) + p_B(S_c - S_T) - p_\Gamma(S_y - S_T)}{m_y} & \text{при } x_y > 0, \\ \left(\frac{dx_y}{dt}\right)_0 = -k_y \left(\frac{dx_y}{dt}\right)_y & \text{при } x_y \leq 0, \\ \frac{d^2x_k}{dt^2} = \frac{p_E(S_y - S_c) + p_B(S_c - S_T) - p_\Gamma(S_y - S_T) - F_h}{m_k} & \text{при } x_k > 0, \\ \left(\frac{dx_k}{dt}\right)_0 = -k_k \left(\frac{dx_k}{dt}\right)_y & \text{при } x_k \leq 0. \end{cases} \quad (11)$$

Обозначения и ограничения аналогичны приведенным для схемы на рис. 2.

Результаты по первому этапу исследований заключаются в следующем: получены физико-математические описания рабочих процессов пневмоударных механизмов группы с удлиненными стержнями, выполненные заодно с хвостовиком инструмента. Данные результаты могут быть использованы для последующих исследований.

Выводы. 1. Уравнения, описывающие рабочие процессы бесклапанных пневматических механизмов с центральной воздухоподводящей трубкой и жестко закрепленным хвостовиком (стержнем) относительно рабочего инструмента, удобны по форме записи и позволяют ориентироваться и прогнозировать тот или иной результат моделирования.

2. Применение пневматических ударных механизмов рассмотренной группы и им подобных по конструктивному исполнению с учетом их положительных качеств целесообразно применить в тяжелых машинах ударного действия в технологиях строительного производства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абраменков, Э.А. Пневматические механизмы машин ударного действия: дробильные, струйные, беззолотниковые, бесклапанные [Текст] / Э.А. Абраменков, Д.Э. Абраменков. — Новосибирск : Изд-во НГУ, 1993. — 430 с.
2. Дедов, А.С. Технология бестраншейной замены трубопроводов водоотведения / А.С. Дедов, А.С. Мельникова, Н.А. Попов, О.В. Ткаченко, Д.Э. Абраменков // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 12. — С. 62–72.
3. Абраменков, Д.Э. Классификация признаков и принципиальные схемы пневмоударных механизмов строительных навесных молотов / Д.Э. Абраменков, А.С. Мельникова, А.С. Дедов, Н.А. Попов, А.В. Грузин, Э.А. Абраменков // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 1. — С. 92–100.
4. А.с. 1046496 СССР. Пневматическая машина ударного действия / Э.А. Абраменков, В.А. Евлолов, Ю.И. Лебедев и др. — Опубл. 1983, Бюл. № 27.
5. А.с. 1445937 СССР. Пневматический молоток / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков. — Опубл. 1988, Бюл. № 47.

АБРАМЕНКОВ Дмитрий Эдуардович, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

АБРАМЕНКОВ Эдуард Александрович, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

ГРУЗИН Алексей Владимирович, асп.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)

КРУТИКОВ Евгений Игоревич, асп.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

ПОПОВ Денис Александрович, асп.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

МЕЛЬНИКОВА Анна Сергеевна, асп.

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Получено 08.06.12

Abramenkov Dmitry Eduardovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Abramenkov Eduard Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Gruzin Alexey Vladimirovich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Krutikov Evgeniy Igorevich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Popov Denis Alexandrovich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Melnikova Anna Sergeevna, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

PRINCIPAL SCHEMES OF AVALVULAR PNEUMOSHOCK MECHANISMS WITH THE IMMOBILE BAR AND THEIR PHYSICAL AND MATHEMATICAL DESCRIPTION

Physical and mathematical descriptions of pneumatic mechanisms are considered with an airsupply tube and immobile bar in the system of air-distribution.

Key words: pneumoshock mechanism, immobile bar, stroke chamber, chamber of network pressure, drummer, airsupply tube.

REFERENCES

1. Abramakov, E.A. Pneumatic mechanisms of actionshockmachines: throttle, jet, without plunger, without valve [Text] / E.A. Abramakov, D.E. Abramakov. — Novosibirsk : Publ. of NGU, 1993. — 430 p.
2. Dedov, A.S. Technology trenchless replacement pipe drainage [Text] / A.S. Dedov, A.S. Melnikova, N.A. Popov, O.V. Tkachenko, D.E. Abramakov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 12. — P. 62–72.
3. Abramakov, D.E. Classification of the principal characteristics and design schemes pneumatic hammer mechanism construction hinged [Text] / D.E. Abramakov, A.S. Melnikova, A.S. Dedov, N.A. Popov, A.V. Gruzin, E.A. Abramakov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 1. — P. 92–100.
4. A.s. 1046496 USSR. Pneumatic Impact /E.A. Abramakov, V.A. Epolov, Yu.I. Lebedev etc. — Publ. 1983, Bull. N 27.
5. A.s. 1046496 USSR. Pneumatic hammer / D.E. Abramakov, E.A. Abramakov. — Publ. 1988, Bull. N 47.

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

УДК 711.4–112(571.1)

Л.Н. ВОЛЬСКАЯ, В.В. КОРОЛЕВ

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СЛОЖЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ГРАДОЭКОЛОГИЧЕСКОГО КАРКАСА КРУПНЫХ ГОРОДОВ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В XVII–XXI вв.

Рассматриваются особенности развития природных ландшафтов в системе «градоэкологических» каркасов крупнейших городов Западной Сибири.

Ключевые слова: периоды развития, природный ландшафт, среда и экология города.

В конце XX в. особенное внимание уделялось закономерностям развития среды обитания в связи с воздействием человека на природные системы, элементы природного ландшафта, рациональной сохранности биологических ресурсов. Одно из главных положений в градостроительстве — формирование в городе системы взаимосвязанных природных ландшафтов как природного «градоэкологического» каркаса. В работах ряда авторов^{1–4} высказывается необходимость создания в городе целостной функционирующей системы природных элементов — лесные массивы, водоемы, реки, парки, скверы и другие природные образования. Такой «градоэкологический» каркас должен играть важную роль при создании генеральных планов городов, выраженных в функциональном зонировании. Анализируя развитие и формирование такого каркаса в крупных городах Западной Сибири, можно выявить определенные особенности, связанные с местными природными и климатическими условиями, что приводится ниже.

Первые города в Сибири начали появляться в конце XVI — начале XVII в. (Тюмень, Тобольск, Томск), выполняя функции пограничных крепостей [2]. В этом случае ключевым в выборе местности было оборонительное значение ландшафта. Река или другие водные преграды должны были окружать крепость с нескольких сторон либо она располагалась на возвышенной части местности. Однако население таких крепостей в мирное время занималось торговлей, ремеслом и земледелием, и впоследствии происходило перефункционирование военной крепости в торгово-административный центр — город.

Наличие водных путей являлось важным фактором для развития торговли в городе, в значительной мере это определялось выгодностью географического положения. Природный ландшафт непосредственно влиял

¹ Владимиров В.В. УрбоЭкология. Курс лекций. М.: МНЭПУ, 1999.

² Глазычев В.Л. Социоэкологическая интерпретация городской среды. М.: Наука, 1984. 180 с.

³ Маслов Н.В. Градостроительная экология. М.: Высш. шк., 2003. 285 с.

⁴ Пивкин В.М., Чиндяева Л.Н. Экологическая инфраструктура сибирского города. Новосибирск: Сибпринт, 2002. 184 с.

на формообразование композиции городского пространства — самые важные и значимые объекты (имевшие к тому же и самые большие объемы) располагались на самых высоких и лучше всего обозримых местах, второстепенные объекты располагались ниже по рельефу. Таким образом, город развивался в системе природного ландшафта, планировочно подчиняясь естественному рельефу, который чаще всего включал в себя крупную реку, систему малых рек и лесные массивы. В связи с малочисленностью жителей элементы ландшафта не подвергались активному негативному антропогенному воздействию.

Так, Томск — один из старейших сибирских городов получил развитие из крепости, расположение которой было выбрано с точки зрения максимальной оборонительной способности местности, и находилась она на надпойменной террасе р. Томи с превышениями в отметках в 20 м относительно поймы реки. Рельеф был осложнен руслами малых рек, разветвленной сетью покрывавших территорию современного города Томска. Большая часть местности была покрыта суходольно-березовыми лесами. Все вместе это составляло устойчивый природный ландшафт с системой естественных дрен и обширным березовым лесом, что являлось позитивным для организации благоприятной жизненной среды обитания (рис. 1).

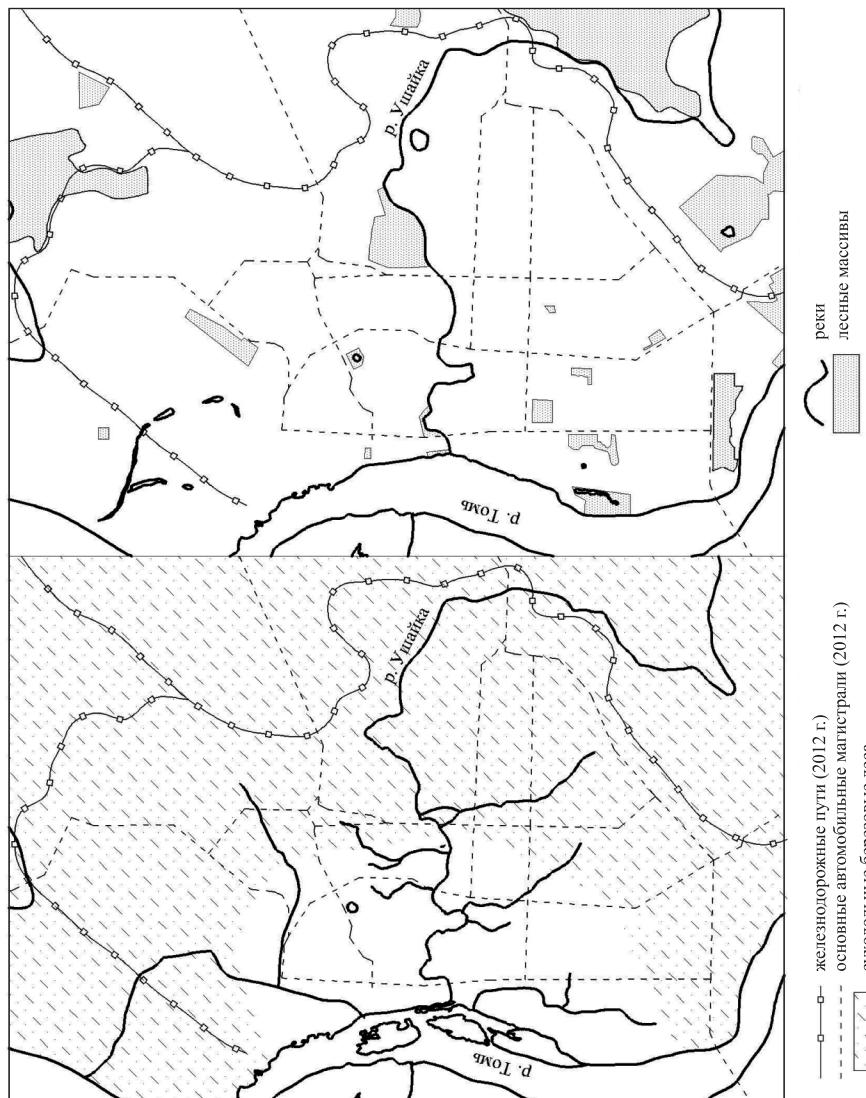


Рис. 1. Томск. Сложение градоэкологического каркаса (начало XIX — начало XXI в.)

В отличие от Томска Омск возник почти на сто лет позже в связи с более поздним освоением этой территории Западной Сибири. Омская крепость была основана в 1716 г. на левом берегу Оми в устье впадения в р. Иртыш [4]. Крутые обрывистые берега Оми (12–15 м) в этом месте служили хорошей защитой крепости от неприятеля. При больших весенних паводках берег возле крепости осыпался и уже в то время нуждался в берегоукрепительных мероприятиях. Местность при приближении к крепости была свободной от лесных массивов и пригодной для ведения сельскохозяйства. Леса в основном были березовые и тополевые. Природно-климатические условия и ландшафт благоприятствовали будущему развитию города, который в дальнейшем становится крупнейшим (рис. 2).

Можно выделить следующие особенности формирования и развития поселений в Западной Сибири до середины XIX в.:

- сибирские крепости располагались на возвышенных местах на мысу у слияния двух рек, иногда у крутого обрыва;
- природные элементы ландшафта, окружающие город, не подвергались значительным антропогенным нагрузкам в XVI–XVII вв. в связи

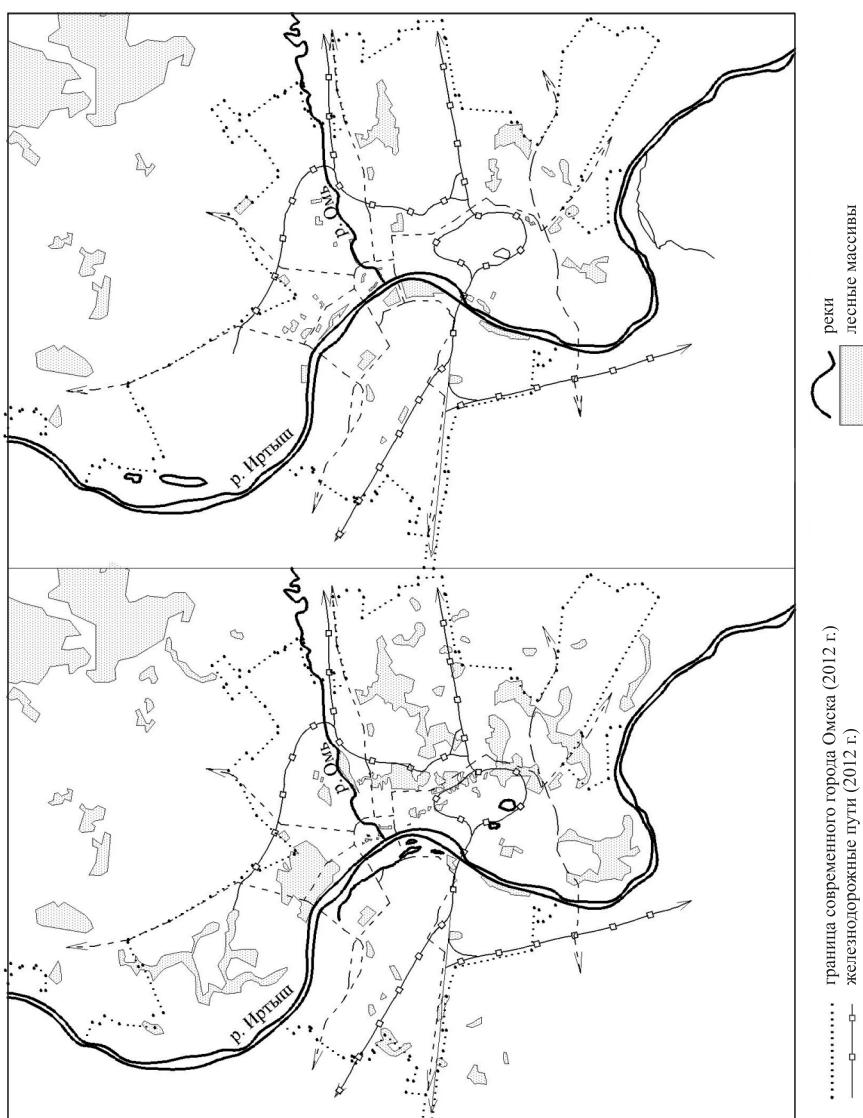


Рис. 2. Омск. Сложение градоэкологического каркаса (начало XX — начало XXI в.)

с малой численностью населения городов-крепостей и малым территориальным ростом;

— в конце XVII — начале XVIII в. характерно разрастание форштадтов, посадов и ослабление значимости крепостных укреплений, архитектурные акценты перемещались на территорию поселений вне крепости. Посадские земли переходили в городские территории, что давало возможность для упорядоченной застройки и планировки, но антропогенная нагрузка на природные ландшафты увеличилась;

— город был тесно связан с сельскохозяйственным производством. Земледелие, садоводство и скотоводство — распространенные занятия горожан. Сады, огороды, пастбища, даже пахотные земли занимали значительную часть территории городов;

— важная особенность данного периода — сложение градостроительного каркаса в интеграции с природным ландшафтом, т.е. начальной стадии сложения «градоэкологического» каркаса.

Анализируя возникновение и развитие рассматриваемых городов, отметим, что их рост был связан с социоэкономическими особенностями региона начиная с XVII в. Самый старейший из рассматриваемых городов Томск (1604 г.), его «градоэкологический» каркас развивался с формированием функциональных зон, увязанных с особенностями природного ландшафта (рекой, рельефом), что особенно четко просматривается на рисунках художников XVIII в. Основная улица — магистраль формировалась застройкой вдоль мощной водной реки Томи, на которую «нанизывались» градостроительные «узлы»: Вознесенская гора с крепостью, монастыри на возвышениях (Свято-Алексеевский), площади города, Татарская слобода.

Важным периодом в Сибири являлся конец XVIII — конец XIX в. Активизация капитализма отразилась в градостроительстве Сибири и состоянии экологии городов, так как активное освоение территорий, создание промышленности и рост населения привели к увеличению антропогенной нагрузки (загрязнению рек, вырубке пригородных лесов, уничтожению малых рек и пр.). Наиболее значительное событие, повлиявшее на развитие городов Сибири, — строительство Транссибирской железной дороги, начавшееся в 1891 г. Отметим, что это негативно отразилось на экологии среды, но стало позитивным явлением в социоэкономическом аспекте.

Города, расположенные на основных железнодорожных линиях, быстро росли и развивались, а те, которые остались в стороне от железной дороги, экономически отставали в своем развитии. Например, Тобольск и Томск, оказавшиеся в стороне от Транссиба, испытывали экономический упадок. И хотя в 1896 г. до Томска проложили железнодорожную ветку, она была тупиковой, и город потерял значение транспортного узла, в отличие от Омска, где пересекались водная и железнодорожная магистрали.

Иногда железная дорога рассекала города на две части и ограничивала их дальнейшее развитие. Так, молодой сибирский город Новосибирск (рис. 3), образовавшийся на важном железнодорожном узле на трассе Транссиба, был отсечен железной дорогой от реки Оби и долгое время испытывал сложность в сообщении центрального района с набережной, а береговая территория, занятая хозяйственно-промышленной зоной, местами превращалась в свалку [2].

В городах конца XIX в. выбор места для строительства фабрик и заводов, как правило, определялся условиями близости расположения желез-



Рис. 3. Новосибирск. Сложение градоэкологического каркаса (конец ХХ — начало ХХI в.)

нодорожных и водных путей, наличием водных объемов для промышленных целей и стоимостью земельных участков. В результате промышленные зоны располагались на окраинах города, часто выше по течению реки и без учета направления ветров, в связи с чем жилые районы города отрезались от реки или попадали в зону задымления. Вокруг железных дорог и промышленных предприятий стихийно складывались новые жилые районы, заселявшиеся рабочими. Они застраивались без всякого плана, как правило, деревянными домами в один или два этажа.

Строительство железной дороги тем не менее играло очень важную роль в развитии городов Западной Сибири. Население сосредоточивалось вдоль линии железной дороги, и наибольшее развитие получили крупные транспортные центры, такие как Новосибирск, Омск и Тюмень. Следует отметить, что хаотичное развитие промышленных предприятий вдоль линии железной дороги, вблизи селитебной территории города оказывало негативное воздействие на экологическое состояние городской среды.

Следующая экологическая проблема, с которой столкнулись развивающиеся крупные города Западной Сибири, — проблема малых рек. Ее можно проанализировать на примере ситуации, сложившейся в Томске в начале XX в. Генеральный план Томска (определенный в 1830 г. развитие города в XIX в.) предусматривал создание систем зеленых насаждений и парков в городской среде, которые до этого почти полностью отсутствовали. Естественная дренажная система в виде малых рек и их притоков претерпела значительные изменения. Почти все притоки р. Ушайки были засыпаны, так как их благоустройство не было предусмотрено на генеральном плане города (см. рис. 1).

Такое воздействие на природные ландшафты заложило предпосылки для роста оврагов и развития оползней на территории города. Высокий уровень грунтовых вод сложился из-за нарушения дренажной системы малых рек. Вырубка лесов для строительства также усугубила ситуацию с оврагообразованием и оползневыми процессами на территории города, связанными с ветровой и водной эрозией почв.

В целом города Западной Сибири во второй половине XIX в. сохраняли, как и прежде, многие черты сельского образа жизни: домашний скот, огороды, сады. Развивалась проблема с инженерным обеспечением городских территорий: отсутствие канализации (самая первобытная даже по тем временам система выгребов), мусор на улицах, сильная загрязненность питьевых вод сточными — все это было одной из причин высокой заболеваемости и смертности городского населения.

В отличие от Томска Омск, расположенный на равнинной части местности, в сухом месте без развитой системы малых рек и больших лесных массивов, в XIX в. столкнулся с проблемой пыльных бурь в летний период и сильных снежных заносов в зимний — в связи с незначительным озеленением городских территорий. Также Омск периодически подвергался большим наводнениям (наиболее крупные в 1818, 1840, 1877 гг.) [4]. В 1840 г. публичных и частных садов и парков в Омске не было [4], благоустройство начинается примерно с середины XIX в. Отсутствие мостовых и тротуаров, пыль, грязь и снежные заносы заставили местные власти в первую очередь обратить внимание на озеленение города.

Во всех губернских городах Западной Сибири в начале XX в. начинают строить водопроводы. В 1905 г. прошел испытание и вступил в строй водопровод в Томске. В Омске до 1934 г. практически отсутствовала канализация. Берега рек Иртыша и Оми являлись местом свалки нечистот и мусора. Канализационные стоки попадали в реки, отправляли источники питьевой воды. В городе часто вспыхивали эпидемии, хуже всего дело обстояло на территории жилой застройки, находящейся на периферии, детская смертность здесь достигала 30–40 % [4]. Первая очередь городской канализации была построена только к 1939 г. Омск в 1935 г. принадлежал к числу наиболее пыльных городов СССР.

Среди исторических городов Сибири очень активно развивался и расширял свои территории самый «молодой» Новосибирск, возникший на месте с. Кривошеево, у железнодорожного перехода через р. Обь. Благоустройство территории велось со значительным отставанием от его экономического развития. Береговая полоса Оби была занята производственными и складскими площадками и не имела озеленения. Крутые берега беспорядочно застраивались индивидуальными жилыми домами. Новосибирск в первые 30–40 лет своего существования можно

охарактеризовать малым количеством озелененных территорий, низкой обеспеченностью системами коммунального хозяйства (такими как ливневая и хозяйственная канализация), что приводило к загрязнению водных бассейнов сточными водами, а также процессами увеличения оврагов в связи с водной и ветровой эрозией.

Анализируя развитие городов Западной Сибири со второй половины XIX в. до 40-х годов XX в., отметим следующие особенности:

- на берегах рек активно возводилась малоэтажная застройка или они становились местом свалки отходов;
- отсутствие и недостаточное количество инженерных сетей влияло на загрязнение рек сточными и канализационными отходами;
- хаотичное размещение промышленных зон и крупных промышленных предприятий без соответствующего функционального зонирования вплоть до 20-х годов XX в.;
- уничтожение лесов на осваиваемых территориях города, нивелирование рельефа;
- переход в индустриальный период развития общества и соответствующее изменение городской среды.

Для крупных городов Западной Сибири период Великой Отечественной войны стал не только временем потерь, но и временем промышленного развития. В эти годы Омск принял около 100 промышленных предприятий, вместе с эвакуированными предприятиями прибыло 150 тыс. рабочих и их семей [4]. В Томск было эвакуировано около 30 предприятий из европейской части России, которые и стали основой промышленности города: за годы войны объем промышленного производства в Томске у tripleлся. Промышленность Новосибирска получила также большое развитие именно в этот период. Всего за годы войны население Новосибирска возросло на 200 тыс. человек [1].

В то же время возрастает и интеллектуальный потенциал крупных городов Западной Сибири — в города эвакуируются десятки учебных заведений, театров, музеев. Эвакуированные предприятия размещались сначала на существующих промышленных зонах, затем занимали помещения медицинских, образовательных и культурных учреждений. Промышленные предприятия располагались в непосредственной близости к жилой застройке. Жилая застройка по упрощенным строительным технологиям занимала окружающую территорию. Расширение промышленного и интеллектуального потенциала города в этот период дало основание будущему развитию и экономическому росту города. Хотя следует отметить, что в этот период возникли проблемы выноса промышленных зон из селитебной территории. Благоустройство города снизилось, увеличилось количество беспорядочной малоэтажной застройки, в основном баракного типа.

Период Великой Отечественной войны можно охарактеризовать:

- упрощением методов строительства зданий и сооружений (особо это коснулось жилого сектора), увеличением количества малоэтажной застройки и несанкционированным ростом селитебной территории;
- увеличением промышленного потенциала городов, хаотичным расположением промышленных зон;
- резким падением благоустроенностии территории городов в целом в связи с военным временем.

Отсутствие «буферных» зон между промышленными площадками и селитебной зоной, повышение плотности застройки привели к негативно-

му состоянию природной среды и ландшафта. Промышленные зоны города нередко располагались без учета розы ветров и вблизи селитебной городской территории. Сохраняется напряженная экологическая ситуация именно в этих зонах. В целом можно отметить, что ухудшение экологического состояния городов в этот период связано с увеличением промышленных мощностей, отставанием строительства необходимых инженерных сетей и недостаточным благоустройством.

Малые реки, находящиеся на городской территории, постепенно деградировали и создавали опасную экологическую обстановку. Особенно остро стояла проблема существования малых рек и системы оврагов в Новосибирске. Река Каменка в 50-х годах прошлого века находилась в очень плохом экологическом состоянии. Вероятно, система оврагов вдоль ее русла увеличилась из-за вырубки лесов на берегах, а также функционирующих до 1925 г. каменоломен по добыче серого гранита. Речка регулярно загрязнялась сточными водами, бытовыми и промышленными отходами, склоны ее были застроены беспорядочной ветхой малоэтажной застройкой, которая периодически подвергалась затоплению. Реку заключили в бетонный коллектор и замыли земляными снарядами, всего было замыто 6 км и 100 м реки [1]. Работы по благоустройству поймы реки продолжились вплоть до 1992 г. Следует отметить, что в генплане города были предложения сделать на месте реки живописные и благоустроенные речные каскады и использовать как рекреационную зону. Малые реки Ельцовка и Ельцовка-2 также находились в тяжелом экологическом состоянии, и эта проблема была решена аналогичным способом — реки заключены в коллектора, которые отчасти остаются не засыпанными, а благоустройство пойм отсутствует.

В целом период от окончания Великой Отечественной войны и до конца XX в. можно охарактеризовать:

— развитием городского благоустройства — строились системы канализаций, водопроводов, очистные сооружения, асфальтировались значительные территории улиц и площадей, развивался пассажирский транспорт, но мероприятия по созданию и развитию экологического каркаса города практически отсутствовали;

— уничтожением и истощением лесных массивов, прилегающих к городу;

— сокращением площади городских парков и рекреационных зон в черте города и почти отсутствием новых, особенно в центральных частях города, где их вытесняла жилая и административная застройка, система озеленения города ограничивалась озеленением центральных улиц, дворовых пространств жилых массивов и территорий административных и образовательных учреждений;

— деградацией малых водных объемов вследствие антропогенной нагрузки и значительным загрязнением крупных рек сточными водами.

Экологические проблемы в городах Сибири в конце XX в. возникли в связи с активной автомобилизацией, повлекшей за собой необходимость адекватного развития улично-дорожной сети, внесение корректив в генеральные планы городов. В загрязнении воздушного бассейна в основном участвует автомобильный транспорт. Существующие проблемы улично-дорожной сети, связанные с возрастанием транспортных потоков, создают в настоящее время значительные потери времени на поездки, а также негативно сказываются на состоянии воздушного бассейна города. Точечная застройка и уплотнение застройки в 1990-е годы привели к

сокращению озеленяемых территорий, особенно в центральных частях городов, также оказалась нарушена исторически сложившаяся композиция застройки городских территорий.

В начале XXI в. города Западной Сибири (Омск, Томск, Новосибирск), ставшие центрами крупных агломераций, столкнулись с различными экологическими проблемами. «Градоэкологический» каркас городов претерпел значительные изменения, под действием антропогенной нагрузки изменились природные ландшафты. На рис. 1–3 отображены изменения экологической системы городов, коснувшиеся экологической декомпенсации использования малых рек, уменьшения площади лесных массивов, увеличения нагрузки на окружающую среду. Проанализировав эти изменения, можно отметить, что для создания устойчивого «градоэкологического» каркаса крупных городов Сибири необходимо:

- учитывать исходные природные условия при выделении рекреационных и природных функциональных зон в городской среде;
- обеспечивать развитие устойчивых функциональных связей сохранившихся элементов природного каркаса на городской территории, создавать пешеходные зоны в центральных исторических частях городов;
- создавать рекреационные зоны в водоохраных зонах малых и крупных рек, используя их в качестве функциональных связей элементов «градоэкологического» каркаса;
- сохранять нормативную плотность озеленения особенно на территориях с высокой плотностью населения, охранять существующие и создавать новые рекреационные зоны и зоны городских лесов;
- развивать экологически чистый городской пассажирский транспорт (трамвай, троллейбус, метро, скоростной трамвай) с выделением отдельных полос движения;
- развивать инженерную инфраструктуру в сфере очистки сточных вод, очистки стоков хозяйственно-бытовой канализации, утилизации бытовых отходов (вторичное использование и переработка);
- обеспечить взаимосвязь элементов «градоэкологического» каркаса с элементами экологического каркаса окружающей территории.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баландин, С.Н. Новосибирск. История градостроительства. 1893–1945 гг. [Текст] / С.Н. Баландин. — Новосибирск : Новосиб. кн. изд-во, 1986. — 160 с.
2. Бунин, А.В. История градостроительного искусства. В 2 т. [Текст] / А.В. Бунин, Т.Ф. Саваренская. — М. : Стройиздат, 1979. — 495 с.
3. Словцов, П.А. Историческое обозрение Сибири [Текст] / П.А. Словцов. — Новосибирск : Вен-Мер, 1995. — 674 с.
4. Энциклопедия города Омска: в 3 т. [Текст] / под ред. Г.А. Павлова, Л.В. Новоселовой, С.Г. Сизова. — Омск : Издат. Дом «ЛЕО», 2009. — Т.1: Омск: от прошлого к настоящему (период с 1716 по 2008 г.). — 2009. — 920 с.

*ВОЛЬСКАЯ Лариса Николаевна, д-р архит., проф.
Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия
КОРОЛЕВ Вячеслав Владимирович, асп.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Сибстрин)*

Получено после доработки 24.05.12

Volskaya Larisa Nikolaevna, doctor of architecture, professor, Novosibirsk State Academy of Architecture and Art, Russia

Korolev Vyacheslav Vladimirovich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**SOME FEATURES OF FORMATION
AND DEVELOPMENT OF ECOPLANNING STRUCTURE
LARGEST CITIES OF WESTERN SIBERIA
(AS AN EXAMPLE OF TOMSK, OMSK AND NOVOSIBIRSK)
IN THE PERIOD XVII–XXI CENTURE**

The article discusses the features of the natural landscape in the «ecoplanning» structure largest cities of Western Siberia.

Key words: periods of development, the landscape, environment and ecology of the city.

REFERENCES

1. Balandin, S.N. Novosibirsk. The history of urban development. 1893–1945 years [Text] / S.N. Balandin. — Novosibirsk : Novosibirsk Book Publishers, 1986. — 160 p.
 2. Bunin, A.V. The history of city planning. In 2 vol. [Text] / A.V. Bunin, T.F. Savarenskaya. — M. : Stroyizdat, 1979. — 495 p.
 3. Slovtsov, P.A. Historical review of Siberia [Text] / P.A. Slovtsov. — Novosibirsk : Wen-Mer, 1995. — 674 p.
 4. Encyclopedia of Omsk: in 3 vol. [Text] / Ed. G.A. Pavlova, L.V. Novoselova, S.G. Sizova. — Omsk : Publishing House «Leo», 2009. — Vol. 1: Omsk: from past to present (the period from 1716 to 2008 year). — 2009. — 920 p.
-

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 53.082.52

В.Г. АНАНИН, С.П. ОСИПОВ, М.Ю. ПОПОВ, Р.В. ФЕДЯЕВ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА АВАРИЙНОГО ТОРМОЖЕНИЯ ЛИФТОВ И ПОДЪЕМНИКОВ С УПРУГОЙ СВЯЗЬЮ

Разработана модель процесса аварийного торможения лифтов и подъемников, которая учитывает наличие упругой связи. Модель позволяет исследовать зависимости перемещения, скорости и ускорения лифта или подъемника от времени для различных наборов параметров, определяющих процесс торможения. Приведен пример расчета.

Ключевые слова: лифт, торможение, перемещение, скорость, ускорение, коэффициент трения, упругость.

Параметры процесса торможения лифтов и подъемников связаны с их техническим состоянием и определяют уровень их безопасности, безотказности, долговечности, комфортности [1]. Временные зависимости перемещения, скорости и ускорения полностью определяют движение лифтов, включая и торможение. Мониторинг указанных параметров лифтов в процессе их длительной эксплуатации позволит следить за техническим состоянием, принимать своевременные меры по ремонту и модернизации, что снизит риск возникновения нештатных и аварийных ситуаций. Перемещения, скорости, ускорения оцениваются современными приборами с высокой точностью и высокой производительностью. Возросшие требования к безопасности и комфорту обусловливают необходимость в проведении теоретических и экспериментальных исследований процессов торможения лифтов [2, 3]. Большинство современных типов лифтов имеют штатные измерители скорости. Ускорения могут быть измерены с помощью различных акселерометров [2], а перемещения — быстродействующими лазерными дальномерами. Перемещения, скорости и ускорения связаны друг с другом, поэтому по известному временному распределению ускорения определяются временные зависимости скорости и перемещения с учетом начальных условий. В лифтах используются различные системы торможения. В литературе имеются математические модели процесса торможения лифтов¹ [4], учитывающие различные аспекты процесса торможения: изменение коэффициента трения от скорости, непостоянство силы нормального давления соприкасающихся при торможении поверхностей. Анализ имеющихся литературных данных позволил сделать вывод о необходимости учета в математической модели процесса аварийного торможения лифтов наличия упругой составляющей.

Построим искомую математическую модель на основе уравнения баланса сил в любой момент времени t . Пусть лифт перемещается строго по вертикали. Координатную ось OX свяжем с вертикалью, направление

¹ Иоффе Е.Я., Глумов В.Р. Сертификация лифтов. М.: Стройиздат, 1994. 248 с.

вниз. В момент времени $t = 0$ происходит обрыв каната и включение ловителей плавного торможения. Анализ торможения начнем с момента времени $t = 0$, в этот момент лифт находится в точке с координатой $x = 0$ и имеет скорость $x'(t=0) = V_0 > 0$. Пусть в момент времени t координата лифта в указанной системе координат равна $x(t)$, лифт движется со скоростью $x'(t)$ и ускорением $x''(t)$.

Введение упругого элемента в математическую модель процесса торможения лифтов может привести к разбиению всего периода торможения на два и более этапов. В рассматриваемом случае в качестве упругого элемента выступает система ловитель — направляющая лифта. В конце первого этапа скорость лифта равняется нулю, но упругий элемент преобразует часть кинетической энергии движущегося лифта в потенциальную энергию упругого элемента. Если равнодействующая побуждающих и сдерживающих движения сил направлена вверх, то на втором этапе часть энергии, запасенной упругим элементом, трансформируется последовательно в кинетическую и в потенциальную энергию лифта, поднятого на некоторую высоту, а оставшаяся часть энергии затрачивается на работу силы торможения. Заметим, что возможен вариант, в котором лифт поднимается выше исходной точки, и упругий элемент с этого момента начинает сжиматься (растягиваться) в другом направлении. В конце второго этапа скорость лифта равна нулю. Если остаточная энергия системы больше нуля и равнодействующая побуждающих и сдерживающих движения сил направлена вниз, то наступает третий этап, в котором лифт движется вниз. Возможно наличие еще нескольких этапов.

Учитывая сказанное выше, приведем описание математической модели торможения лифтов на каждом из этапов.

Первый этап. На первом этапе препятствуют движению лифта вниз две силы — сила трения и сила упругости, а способствует движению вниз сила тяжести. В этом случае уравнение баланса сил [4] дополняется слагаемым, обусловленным силой упругости. Уравнение баланса примет вид

$$mx''(t) - mg + \mu(t)R(t) + k(t)x(t) = 0, \quad (1)$$

где m — масса кабины с грузом, кг;

$R(t)$ — сила нормального давления на тормозную колодку в момент времени t , Н;

$\mu(t)$ — текущее значение коэффициента трения между элементами тормозной пары (клином и колодкой);

g — ускорение свободного падения;

$k(t)$ — текущее значение некоторого коэффициента k .

Заметим, что уравнение (1) выведено в предположении, что величина сжатия упругого элемента $y(t)$ пропорциональна величине перемещения лифта в процессе торможения — $y(t) = cx(t)$. Упругие свойства тормозной пары будет характеризовать коэффициент $K = k/c$. В первом приближении можно считать $k(t) = k_0 = \text{const}$.

Начальные условия для дифференциального уравнения (1) связаны с началом торможения

$$x(0) = 0, x'(0) = V_0. \quad (2)$$

Решение дифференциального уравнения (1) с начальными условиями (2) позволяет оценить временные зависимости $x(t)$, $x'(t)$ и $x''(t)$.

Первый этап заканчивается в момент времени t_1 — $x'(t_1) = 0$. Запасенная упругим элементом энергия E_1 на первом этапе оценивается по формуле

$$E_1 = \frac{Kx^2(t_1)}{2}. \quad (3)$$

Второй этап. На втором этапе препятствуют движению лифта вверх две силы — сила трения и сила тяжести, а способствует движению вверх только сила упругости. Условие наступления второго этапа описывается выражением

$$kx(t_1) > \mu(t_1)R(t_1) + mg. \quad (4)$$

Если условие (4) не выполняется, то набор $x(t)$, $x'(t)$ и $x''(t)$, $t \leq t_1$ полностью характеризует процесс торможения лифта.

Уравнение баланса сил на рассматриваемом этапе с учетом замечаний, сделанных выше, выглядит аналогично (1)

$$mx''(t) - mg - \mu(t)R(t) + k(t)x(t) = 0. \quad (5)$$

Начальные условия для дифференциального уравнения (5) определяются моментом времени смены направления движения, т.е. моментом времени

$$x(t_1) = x_1, x'(t_1) = 0. \quad (6)$$

Решением краевой задачи (5), (6) является временная зависимость $x(t)$, $t > t_1$, которая позволяет оценить временные зависимости скорости и ускорения — $x'(t)$, $x''(t)$.

Второй этап процесса торможения лифта заканчивается в момент времени t_2 — $x'(t_2) = 0$. Приращение потенциальной энергии лифта E_2 , обусловленное его подъемом на высоту $x(t_2) - x(t_1)$, находится по формуле

$$E_2 = mg(x(t_1) - x(t_2)). \quad (7)$$

Третий этап. На третьем этапе, так же как и на первом, препятствуют движению лифта вниз две силы — сила трения и сила упругости, а способствует движению вниз сила тяжести. Отличие от первого этапа заключается в том, что лифт в момент времени t_2 обладает нулевой скоростью, поэтому он начнет двигаться вниз только при выполнении условия

$$mg > \mu(t_2)R(t_2) + kx(t_2). \quad (8)$$

Процесс торможения на третьем этапе описывается дифференциальным уравнением (1) с начальными условиями

$$x(t_2) = x_2, \quad x'(t_2) = 0. \quad (9)$$

Искомая временная зависимость перемещения лифта дополняется решением дифференциального уравнения (1) с начальными условиями (9) на интервале от момента времени t_2 до момента времени t_3 , $x'(t_3) = 0$.

Возможные дополнительные этапы процесса торможения описываются аналогично второму и третьему этапам.

Функции $\mu(t)$, $R(t)$ и $k(t)$ полностью определяют решение краевых задач, описываемых выражениями (1)–(4), (9) ограничениями (4), (8). В работе [4] предлагается использовать для описания коэффициента трения функцию $\mu(t)$, характеризующую процесс трения рабочих элементов тормозной пары и зависящую от текущего значения скорости, материала элементов тормозной пары. Для более точного описания переходного процесса от равномерного движения к равнозамедленному учитывается функциональная зависимость силы нормального давления от времени на тормозную колодку.

Для описания зависимости коэффициента трения от скорости $\mu(x'(t))$ в [4] используется следующая аппроксимация:

$$\mu(x'(t)) = \frac{1}{\alpha(x'(t) - \chi)^2 + \beta} + \gamma, \quad (10)$$

где $\alpha, \chi, \beta, \gamma$ — коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов² по экспериментальной зависимости коэффициента трения от скорости перемещения подвижного элемента тормозной пары относительно неподвижного элемента. Коэффициент χ характеризует положение максимума на зависимости $\mu(x')$, коэффициент γ близок к коэффициенту трения для больших скоростей, а коэффициент α определяет скорость изменения коэффициента трения. Погрешность аппроксимации (10) экспериментальных данных³ не превысила 7 %.

Относительно силы нормального давления $R(t)$ в [4] сделано допущение о возрастании функции $R(t)$ с насыщением. Предложено использовать для описания $R(t)$ следующую двухпараметрическую функцию:

$$R(t) = R_{\max}(1 - e^{-\eta t}), \quad (11)$$

где R_{\max} — максимальное значение силы нормального давления соприкасающихся элементов тормозной пары при торможении;

η — параметр, характеризующий скорость нарастания силы нормального давления от времени.

Значения параметров R_{\max} и η определяются методом наименьших квадратов² по экспериментальной зависимости силы нормального давления соприкасающихся элементов тормозной пары при торможении от времени. Отметим, что выражение (10) наиболее точно описывает поведение силы нормального давления на интервале ее возрастания. Соответствующая погрешность не превосходит 5 %.

Уравнения (1), (3) в совокупности с выражениями (10), (11) представляют собой нелинейные дифференциальные уравнения второго порядка.

Набор формул (1)–(11) является основой математической модели процесса аварийного торможения лифтов и подъемников с учетом упругой связи. Все используемые коэффициенты определяются на стадии экспериментальных исследований.

Предлагаемая математическая модель процесса аварийного торможения лифта учитывает работу силы торможения и трансформацию энергии в упругом элементе. Для решения таких краевых задач существует достаточно много программ, написанных на языках высокого уровня (Fortran, Delphi, C++ и др.), а также в системах математических расчетов MatCad, Matlab, Maple и т.д. Следует отметить, что предлагаемые краевые задачи дополняются условиями останова лифта (прекращения движения).

Математическая модель аварийного торможения лифта, основанная на выражениях (1)–(11), может быть использована не только на этапе проектирования лифтов и подъемников для проверки соответствия параметров торможения существующим нормам и правилам, но и для технической диагностики лифтов и подъемников в период их эксплуатации.

Для применения на практике предлагаемой математической модели необходимо определиться с начальными условиями, массой лифтовой ка-

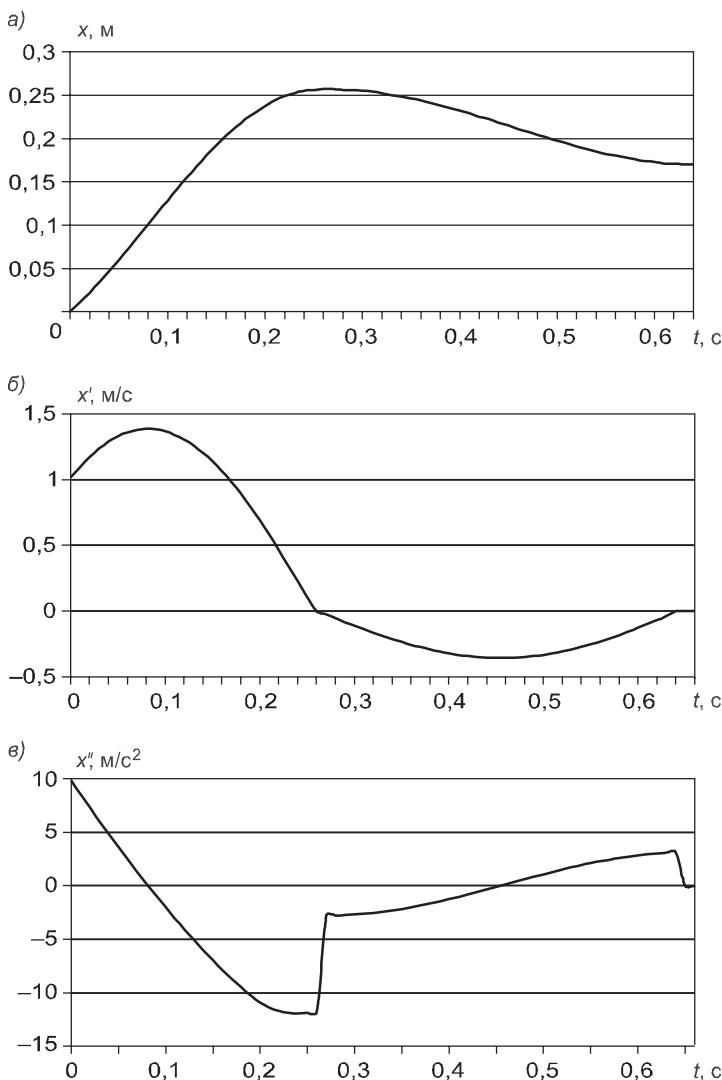
² Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач методом наименьших квадратов. М.: Наука, 1986. 232 с.

³ Богданович П.Н., Галай Э.И. Оценка трибологических характеристик композиционных материалов для тормозных колодок при малых скоростях скольжения // Вестник ВНИИЖТ. 2005. № 2. С. 27–30.

бины и полным набором параметров $\alpha, \chi, \beta, \gamma, R_{\max}, \eta, k$. Параметры $\alpha, \chi, \beta, \gamma$ определяют временную зависимость коэффициента трения элементов тормозной пары, η, R_{\max} — временную зависимость нормальной силы, коэффициент k характеризует упругий элемент. Для большинства пассажирских лифтов накладываются ограничения на скорость перемещения, поэтому можно принять, что начальные условия (2) будут иметь вид

$$x(0)=0, \quad x'(0)=1 \text{ м/с}. \quad (12)$$

Для иллюстрации работоспособности предлагаемой модели были рассчитаны временные распределения перемещения, скорости и ускорения лифта на этапе торможения для значений параметров $\alpha, \chi, \beta, \gamma, R_{\max}, \eta$ из [4] $\alpha = 25 \text{ с}^2/\text{м}^2$, $\beta = 7$, $\gamma = 0,46$, $\chi = 0,6 \text{ м/с}$, $\eta = 14$, $R_{\max} = 4 \text{ кН}$, $m = 450 \text{ кг}$ и значения коэффициента $k = 30 \text{ кН/м}$. Значение коэффициента k получено в результате обработки кинематических параметров лифта схожей массы при посадке на ловители с имитацией обрыва тяговых канатов¹. На рисунке *a–в* приведены зависимости $x(t)$, $x'(t)$, $x''(t)$ со-



Временные распределения параметров процесса торможения
а — перемещение; *б* — скорость; *в* — ускорение

ответственно. Для рассматриваемого случая наблюдается одна смена направления движения лифта. Общее время торможения не превысило 0,6 с. Максимальное значение перемещения лифта с момента торможения составило 0,258 м, а общее перемещение лифта — 0,17 м.

Математическая модель процесса аварийного торможения лифта с учетом упругой связи, основанная на выражениях(1)–(12), позволяет оценить временные зависимости перемещения, скорости, ускорения, исходя из теоретических или экспериментальных данных зависимостей коэффициента трения от скорости движения лифта, временной зависимости силы нормального давления и значения коэффициента, характеризующего упругий элемент.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технический регламент о безопасности лифтов [Текст] // Безопасность труда в промышленности. — 2009. — № 11. — С. 52–64.
2. Красовский, А.А. Определение положения лифта и параметров движения методами инерциальной навигации [Текст] / А.А. Красовский, А.Ю. Антонов // Лифт. — 2010. — № 8. — С. 23–28.
3. Осипов, С.П. Способ определения параметров торможения лифтов и подъемников на основе анализа потока фотоизображений [Текст] / С.П. Осипов, М.Ю. Попов, Р.В. Федяев, А.А. Косач // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. — Вып. 4 (38). — 2011. — 9 с. — <http://ipb.mos.ru/ttb/2011> — 4. — 0421100050/0059.
4. Осипов, С.П. Многопараметрическая математическая модель процесса плавного торможения лифтов [Текст] / С.П. Осипов, М.Ю. Попов, Р.В. Федяев // Механизация строительства. — 2012. — № 2. — С. 24–26.

АНАНИН Владимир Григорьевич, д-р техн. наук, проф.

*Томский государственный архитектурно-строительный университет
ОСИПОВ Сергей Павлович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: osip1809@rambler.ru*

Томский государственный архитектурно-строительный университет

ПОПОВ Михаил Юрьевич, канд. техн. наук, доц.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

ФЕДЯЕВ Роман Викторович, асп.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено после доработки 10.05.12

Ananin Vladimir Grigorievich, doctor of technical sciences, professor, Tomsk State University of Architectural and Civil Engineering, Russia

Osipov Sergey Pavlovich, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: osip1809@rambler.ru, Tomsk State University of Architectural and Civil Engineering, Russia

Popov Mihail Yurievich, candidate of technical sciences, assistant professor, Tomsk State University of Architectural and Civil Engineering, Russia

Fedyaev Roman Viktorovich, post-graduate student, Tomsk State University of Architectural and Civil Engineering, Russia

THE MATHEMATICAL MODEL OF AN EMERGENCY BRAKING OF LIFT WITH ELASTIC COUPLING

Improved model of the process of an emergency braking of lifts, which takes into account the presence of the elastic coupling. The model allows to study the dependence of displacement velocity and acceleration of the lifts from time to time for various sets of parameters that define the process of inhibition. An example of the calculation was made.

Key words: lift, braking, displacement, velocity, acceleration, friction coefficient, elasticity.

REFERENCES

1. Technical regulation on safety of lifts [Text] // Safety in industry. — 2009. — N 11. — P. 52–64.
 2. Krasovsky, A.A. Determination of the lift and motion parameters of the methods of inertial navigation [Text] / A.A. Krasovsky, A.Yu. Antonov // Lift. — 2010. — N 8. — P. 23–28.
 3. Osipov, S.P. The method of determining the parameters of inhibition of lifts and elevators on the basis of the analysis of flow picture [Text] / S.P. Osipov, M.Yu. Popov, R.V. Fedyayev, A.A. Kosach // Technology Technosphere safety: online journal. — Vol. 4 (38). — 2011. — 9 p. — <http://ipb.mos.ru/ttb/2011> — 4. — 0421100050/0059.
 4. Osipov, S.P. A multiparameter mathematical model of a smooth deceleration of lifts [Text] / S.P. Osipov, M.Yu. Popov, R.V. Fedyayev // Mechanization of construction. — 2012. — N 2. — P. 24–26.
-

УДК 621.436.004.672

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

**ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИКАТОРА МОТОРНОГО МАСЛА
НА ОСНОВЕ СЕРПЕНТИНА И МЯГКИХ МЕТАЛЛОВ
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗЕМСНАРЯДА ТИПА ДЭР-250**

Приведены полученные результаты эксплуатационных исследований модификатора моторного масла, в состав которого входит серпентин и мягкие металлы.

Ключевые слова: модификатор моторного масла, износ, скорость износа, моторное масло, земснаряд.

Для оценки возможности применения модификатора моторного масла на основе серпентина и мягких металлов в двигателях дорожных и строительных машин был проведен эксперимент при штатной эксплуатации земснаряда типа ДЭР-250, на котором установлены главный дизельный двигатель SKODA 6L275/III и три вспомогательных — два SKODA 6S160 и один SKODA 2S110. Так как на земснаряде два двигателя абсолютно одинаковые и работают они в одинаковых условиях (табл. 1), эксперимент проходил при добавлении в моторное масло одного двигателя предлагаемого модификатора и отбора проб работающего масла с обоих двигателей в процессе их эксплуатации. Далее проводился анализ отобранных проб масла по методике «Система диагностирования дизелей по методу комплексного анализа смазочного масла» (СТП 314.536.0-01-88), а весь ход эксперимента — по сертифицированным методикам РОСС Ру.АЯ79.М52040 0219784.

Основные конструктивные особенности двигателя SKODA 6S160:

1. Картер изготовлен из сплава АЛ-4.
2. Цилиндры изготовлены из стали 38ХМА, внутренняя поверхность азотирована.
3. Поршень штампованный, дюралевый, внутри поршня бобышки, в которые запрессованы втулки из бронзы Бр7-02.
4. Вкладыши подшипников коленчатого вала стальные с тонким слоем (0,015–0,020 мм) оловянно-свинцовой бронзы БрОС1-22, наружная поверхность шатунных вкладышей омеднена.
5. Втулки верхней головки шатуна и втулки прицепных шатунов изготовлены из высокооловяннистой бронзы БрОФ7-0,2.

Эксплуатационные материалы, применяемые в ходе эксперимента:

1. На исследуемых двигателях использовалось дизельное топливо ДС ГОСТ 305–82 «Топливо дизельное. Технические условия». Цетановое число колебалось в пределах 52–56,6, а содержание серы от 0,12 до 0,15 %. По остальным показателям (вязкость, температура вспышки, коэффициент фильтруемости, содержание фактических смол и т.п.) топливо также соответствовало требованиям стандарта. Плотность топлива в пределах 0,840–0,837.

2. При эксплуатации двигателей использовали моторное масло М-10В₂ ГОСТ 8581–78.

Таблица 1

Основные данные двигателя SKODA 6S160

Показатель	Значение
$N_{\text{ном}}$, Вт (лс)	735499 (1000)
$n_{\text{ном}}$, об./мин	1700
Время непрерывной работы на номинальном режиме, ч	Не более 15
$N_{\text{макс}}$, Вт (лс)	809049 (1100)
$n_{\text{макс}}$, об./мин	1800
Время работы на режиме максимальной мощности, ч	Не более 1
Количество цилиндров	12
Литраж, л	62,4
Наддув	Механический, центробежный
Давление наддува, Па · 10 ⁵ (кгс/см ²)	1,52 (1,55)
Емкость масла, л	150
Температура масла, °С	
вход	50–67
выход	95
Удельный расход топлива, г/Вт · ч	0,262
г/лс · ч	192
Удельный расход масла при номинальном режиме, г/Вт · ч · 10 ⁻³	8,15
г/лс·ч	6,0

3. Модификатор, применяемый в исследованиях, состоял из 75 % (медь-олово) мягких металлов и 25 % серпентина, так как именно этот состав показал наилучшие результаты при исследованиях в лабораторных условиях, опубликованные в статье «Лабораторные исследования модификатора моторного масла на основе серпентина и мягких металлов». Данный модификатор добавлялся в моторное масло одного двигателя в количестве 1,25 г сухой смеси модификатора на 1 л моторного масла.

Результаты исследования физико-химических показателей работающего масла двигателей SKODA 6S160:

1. Механические примеси. В данном исследовании загрязненность оценивалась по содержанию нерастворимых осадков (ГОСТ 20684–75 «Масла моторные отработанные. Метод определения нерастворимых осадков») и по содержанию негорючих примесей (ГОСТ 6370–83 «Нефть, нефтепродукты и присадки. Метод определения механических примесей» с применением обеззоленного фильтра «белая лента» с последующим его озолением).

Определенной закономерности изменения нерастворимых примесей в работающем масле в зависимости от времени работы двигателя после смены масла в данном исследовании не замечено. Содержание нерастворимых осадков в основном находилось в пределах 0,90–1,30 %. Минимальное значение, наблюдаемое в данном исследовании, было 0,74 %, а максимальное в момент добавления в масло модификатора — 1,9 %.

Негорючие механические примеси показывают долю крупных частиц, циркулирующих в масле. При работе одного двигателя на масле М-10В₂ среднее содержание негорючих примесей мало и составляет 0,03 %. При добавлении модификатора в масло второго двигателя среднее содержание негорючих примесей возрастает в 1,5 раза и составляет 0,045 %.

Особенно резко увеличивается содержание негорючих примесей в первые часы работы двигателя после внесения модификатора, но при дальнейшей работе двигателя их содержание стабилизировалось и в среднем составляло 0,032–0,36 %.

Зольность свежих масел определяется составом присадки. В процессе работы двигателя наблюдалась стабилизация этого показателя. При работе двигателей на чистом масле средняя зольность 0,393 % с пределами колебаний 0,30–0,50 %, а при работе на масле с введенным в него модификатором — 0,601 % с пределами колебаний 0,47–0,75 %.

Вязкость моторного масла в процессе эксплуатации за счет окисления увеличивалась, а случаев существенного разжижения масла топливом не наблюдалось. Введение модификатора в масло никак не влияло на его вязкостные показатели. Практически двигатели работали в среднем на масле с вязкостью 10–12 сСт.

Температура вспышки. В исследуемых двигателях температура вспышки работающего масла была в среднем выше 210 °С. В процессе наблюдения отмечено только два случая снижения температуры вспышки до 188 °С.

Плотность распределения элементов в работающем масле по результатам спектрального анализа. Теоретический анализ процесса накопления примесей, выполненный с применением универсального уравнения, показывает, что в двигателях SKODA 6S160 при емкости масла $Q_0 = 80$ кг и интенсивности его угаря $q_y = 2,98$ кг/ч стабилизация наступает примерно через 40–60 ч работы, а интенсивность поступления примесей в масло не должна существенно меняться. Если регламентированный срок службы масла 300 ч, то 250 из них, или 85 %, двигатель работает в режиме стабилизации уровня концентрации химических элементов в работающем масле. Поэтому исследование закономерностей износа по плотности распределения химических элементов в работающем масле в данном случае будет достаточно достоверно даже при ограниченном количестве экспериментов.

1. Железо. Содержание железа в масле является основным показателем, характеризующим износ двигателя, главным образом деталей ЦПГ.

Ряды распределения содержания железа в работающем масле М-10В₂ и М-10В₂ с введенным в него модификатором представлены в табл. 2.

Таблица 2
Ряды распределения содержания железа в работающем масле
двигателей SKODA 6S160

Fe, г/т	Без применения модификатора		С применением модификатора	
	Кол-во	P	Кол-во	P
0–0,001	1	0,03	4	0,11
0,001–0,002	10	0,27	15	0,41
0,002–0,003	12	0,32	12	0,32
0,003–0,004	8	0,22	2	0,05
0,004–0,005	2	0,05	2	0,05
0,005–0,006	1	0,03	1	0,03
0,006–0,007	1	0,03	1	0,03
0,007–0,008	1	0,03	—	—
Свыше 0,008	1	0,02	—	—
Всего	37	1,00	37	1,00

2. *Олово* в работающее масло двигателей SKODA 6S160 поступает от износа втулок, изготовленных из бронзы Бр ОФ 7-0,2 (втулки верхней головки главных шатунов, втулки прицепных шатунов, втулки бобышек поршня) и от износа вкладышей подшипников коленчатого вала, залитых оловянисто-свинцовистой бронзой Бр ОС 1-22. Также поступление олова ожидается от внесения модификатора в моторное масло.

Ряды распределения содержания олова в работающем масле M-10B₂ и M-10B₂ с введенным в него модификатором представлены в табл. 3.

Таблица 3
Ряды распределения содержания олова в работающем масле
двигателей SKODA 6S160

Sn, 10 ⁻⁴ г/т	Без применения модификатора		С применением модификатора	
	Кол-во	P	Кол-во	P
0–0,25	1	0,03	7	0,19
0,25–0,5	21	0,57	17	0,46
0,5–0,75	10	0,32	8	0,22
0,75–1,00	3	0,08	2	0,05
1,00–1,25	1	0,03	1	0,03
1,25–1,50	—	—	—	—
1,50–1,75	1	0,03	—	—
1,75–2,00	—	—	2	0,05
Свыше 2,00	—	—	—	—
Всего	37	1,00	37	1,00

3. *Свинец* в работающее масло двигателей SKODA 6S160 поступает от износа внутренней поверхности вкладышей подшипников коленчатого вала, залитых оловянисто-свинцовистой бронзой Бр ОС 1-22.

Ряды распределения содержания свинца в работающем масле M-10B₂ и M-10B₂ с введенным в него модификатором представлены в табл. 4.

Таблица 4
Ряды распределения содержания свинца в работающем масле
двигателей SKODA 6S160

Pb, г/т	Без применения модификатора		С применением модификатора	
	Кол-во	P	Кол-во	P
0–0,02	11	0,30	14	0,38
0,002–0,004	18	0,49	19	0,51
0,004–0,006	4	0,11	3	0,08
0,006–0,008	2	0,05	1	0,03
0,008–0,01	2	0,05	—	—
Всего	37	1,00	37	1,00

4. *Медь*. Поступление меди в работающее масло двигателей SKODA 6S160 происходит от износа деталей, изготовленных из бронзы Бр ОФ 7-0,2 (втулки верхней головки главных шатунов, втулки прицепных шатунов, втулки бобышек поршня) и от износа оловянисто-свинцовистой бронзы Бр ОС 1-22 подшипников коленчатого вала. Также поступление меди ожидается от внесения модификатора в моторное масло.

Ряды распределения содержания меди в работающем масле M-10B₂ и M-10B₂ с введенным в него модификатором представлены в табл. 5.

Таблица 5

Ряды распределения содержания меди в работающем масле двигателей SKODA 6S160

Sn, 10^{-4} г/т	Без применения модификатора		С применением модификатора	
	Кол-во	P	Кол-во	P
0–0,005	15	0,41	21	0,57
0,005–0,010	13	0,35	9	0,24
0,010–0,015	8	0,21	3	0,08
0,015–0,020	1	0,03	1	0,03
0,020–0,025	—	—	1	0,03
0,025–0,030	—	—	—	—
0,030–0,035	—	—	2	0,05
0,035–0,040	—	—	—	—
Всего	37	1,00	37	1,00

Анализ данных, собранных с двигателей SKODA 6S160 при штатной эксплуатации земснаряда типа ДЭР-250 в течение 1500 моточасов, показал следующие результаты:

1. Физико-химические (механические примеси, зольность, вязкость, температура вспышки) показатели работающего масла не претерпели значительных изменений после введения в него модификатора и остались в пределах допустимых норм для эксплуатации исследуемых двигателей.

2. Содержание железа в работающем масле после введения в него модификатора значительно снизилось (см. табл. 2) по сравнению с чистым маслом, вследствие чего можно говорить о снижении общего износа цилиндропоршневой группы двигателя.

3. Содержание олова в работающем масле в первые часы работы двигателя резко увеличилось после введения в него модификатора, что объясняется непосредственным содержанием олова в модификаторе. Но после непродолжительной наработки (около 80 ч) его содержание снижается и в целом по всему периоду наблюдения становится ниже, чем в чистом масле (см. табл. 3). При таком снижении содержания олова в работающем масле можно судить о снижении скорости износа вкладышей подшипников коленчатого вала.

4. Снижение концентрации свинца в работающем масле после введения в него модификатора также подтверждает снижение износа вкладышей подшипников коленчатого вала (см. табл. 4).

5. Увеличение содержания меди в работающем масле после введения в него модификатора обусловлено содержанием меди непосредственно в модификаторе. Дальнейшее ее уменьшение в процессе эксплуатации двигателя говорит о снижении скорости износа вкладышей подшипников коленчатого вала (см. табл. 5).

Выходы. Проведенные эксплуатационные наблюдения двух одинаковых двигателей, эксплуатирующихся в идентичных условиях на земснаряде типа ДЭР-250, подтвердили возможность использования модификатора моторного масла на основе серпентина и мягких металлов в двигателях дорожных и строительных машин. Применение данного модификатора не повлечет за собой критических изменений физико-химических показателей моторного масла и позволит снизить скорость износа ЦПГ и подшипников коленчатого вала в 1,2–2 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаркунов, Д.Н. Триботехника. Краткий курс [Текст] / Д.Н. Гаркунов, Э.Л. Мельников, В.С. Гаврилюк. — М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. — 344 с.
2. Ломухин, В.Б. Основы современной эксплуатации двигателей [Текст] / В.Б. Ломухин. — Новосибирск : Наука, 2004. — 188 с.

ВИНОГРАДОВ Алексей Борисович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: smae@sibstrin.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

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

СУРГИН Вячеслав Владимирович, асп.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 21.05.12

Vinogradov Alexey Borisovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: smae@sibstrin.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

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

Surgin Vyacheslav Vladimirovich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

MODIFIER IS APPLIED BASED ENGINE OIL SERPENTINE AND SOFT METAL DREDGE OPERATING TYPE DER-250

The paper presents the results of operational research modifier of motor oil in the composition, which includes serpentine and soft metals.

Key words: modifier of motor oil, wear, wear rate, motor oil, dredge.

REFERENCES

1. Garkunov, D.N. Tribotehnika. A short course [Text] / D.N. Garkunov, E.L. Melnikov, V.S. Gavrilyuk. — M. : Publishing House of Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, 2008. — 344 p.
 2. Lomuhin, V.B. Bases of modern operation of engines [Text] / V.B. Lomuhin. — Novosibirsk : Science, 2004. — 188 p.
-

УДК 624.014.2

В.В. КАТЮШИН

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОДАТЛИВОСТИ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ИЗГИБНУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ЦЕНТРАЛЬНО-СЖАТЫХ СТОЕК

Рассмотрены вопросы влияния податливости фланцевых соединений на устойчивость колонн и элементов рам. Определены аналитическими и численными методами параметры податливости фланцевых соединений при различных способах расстановки болтов и толщине фланцев. Предложены практические методы учета податливости фланцевых соединений при расчетах указанных конструкций на устойчивость.

Ключевые слова: фланцевые соединения, податливость, устойчивость.

Элементы рамных конструкций двутаврового сечения в основном имеют монтажные фланцевые соединения на высокопрочных болтах. Эти соединения обладают некоторой податливостью, которая может оказывать негативное влияние на устойчивость элементов рам как в плоскости, так и из плоскости их наибольшей жесткости. В особой степени это проявляется при изгибе из плоскости стенки двутавров и поэтому в дальнейшем будем рассматривать именно эти случаи. Влияние податливости соединений на работу сжатых элементов заключается в возможном уменьшении критической нагрузки по сравнению со сплошными элементами.

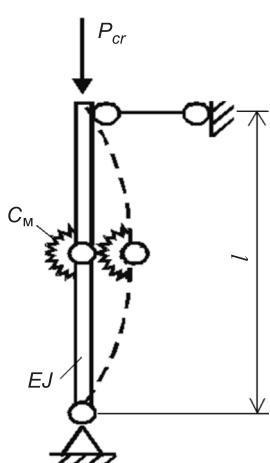


Рис. 1. Потеря устойчивости центрально-сжатых стоек с податливым соединением

Этот эффект может проявляться не только для колонн и стоек, но и для сжатых поясов балок и рам при потере устойчивости по изгибо-крутильной форме. Для определения влияния податливости фланцевых соединений рассмотрим шарнирно опертую центрально-сжатую стойку с фланцевым соединением посередине (симметричная задача). Расчетную схему стойки представим в виде двух упругих стержней, соединенных между собой податливым узлом, моделирующим соединение (рис. 1). В зависимости от жесткости фланцевого соединения возможны следующие случаи потери устойчивости [1].

1. Жесткость узла достаточно велика и стойка теряет устойчивость как сплошной стержень (см. рис. 1, а) при критической эйлеровой нагрузке

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{l^2}. \quad (1)$$

2. Жесткость узла мала и стойка теряет устойчивость, «переламываясь» в месте установки фланцевого соединения (см. рис. 1, б). Изгибом стойки в этом случае можно пренебречь, а критическая нагрузка P_{cr} найдется из уравнения

$$P_{cr} = \lim_{\phi \rightarrow 0} P(\phi) = \frac{2C_M}{\ell}, \quad (2)$$

где C_M — жесткость упругой заделки, равная моменту при взаимном повороте сечения в узле на единичный угол;

ϕ — угол поворота сечения стержня в узле.

3. Жесткость узла имеет некоторое промежуточное значение, при котором необходимо одновременно учитывать изгиб составляющих ее стержней и перегиб в месте фланцевого соединения (см. рис. 1, б). В этом случае критическая нагрузка P_{cr} определяется из нелинейного уравнения при $k = \sqrt{P_{cr} / EJ}$

$$k \cdot \ell \cdot \operatorname{tg}\left(k \cdot \frac{\ell}{2}\right) = \frac{\ell C_M}{EJ}. \quad (3)$$

Для определения граничных значений жесткости узла, при которой потеря устойчивости происходит по той или иной схеме, введем по аналогии с [1] и [2] понятие относительной жесткости узла при повороте

$$\bar{C}_M = \frac{\ell \cdot C_M}{EJ}. \quad (4)$$

Согласно [1] можно считать, что при $\bar{C}_M < 0,1$ потеря устойчивости происходит по второй схеме без изгиба стержня. При $\bar{C}_M > 70$ податливостью шарнира можно пренебречь, а устойчивость стержня рассчитывать по формуле Эйлера. В остальных случаях расчеты следует проводить по третьей схеме с учетом изгибных деформаций стержней и жесткости узла. При определении изгибной жесткости фланцевого соединения введем допущения, основанные на экспериментальных и численных исследованиях автора:

1. Поворот соединения происходит вокруг оси, соединяющей наружные торцевые грани полок (рис. 2, а).

2. Повороту соединения препятствуют реактивные усилия, возникающие в соединении при его повороте (рис. 2, б).

3. Реактивные усилия определяются как для защемленных или консольных пластин, нагруженных сосредоточенной силой.

4. При рассмотрении работы зон фланца вблизи полок и стенки пре-небрегаем сложным характером их взаимодействия, принимая их работу независимой.

5. Для учета фактической работы фланцевых соединений используются корректирующие коэффициенты, полученные по МКЭ (рис. 2, г, д).

При действии изгибающего момента M в плоскости полок двутавра соединение поворачивается на угол ϕ , деформации фланца приводят к появлению реактивных усилий, препятствующих повороту в соединении. Условие равновесия соединения запишется в виде

$$M = M_f + M_w, \quad (5)$$

где момент M_f определяется от реактивных усилий q_f , действующих вдоль полок: $M_f = 2q_{f\max} \cdot b_f^2 / 3$; момент M_w находится по результирующей силе P_w в стенке: $M_w = 0,5P_w \cdot b_f$, при $P_w = q_w \cdot h_{ew}$, где q_w — реактивные усилия, действующие вдоль стенки; h_{ew} — размер зоны постановки болтов вдоль стенки.

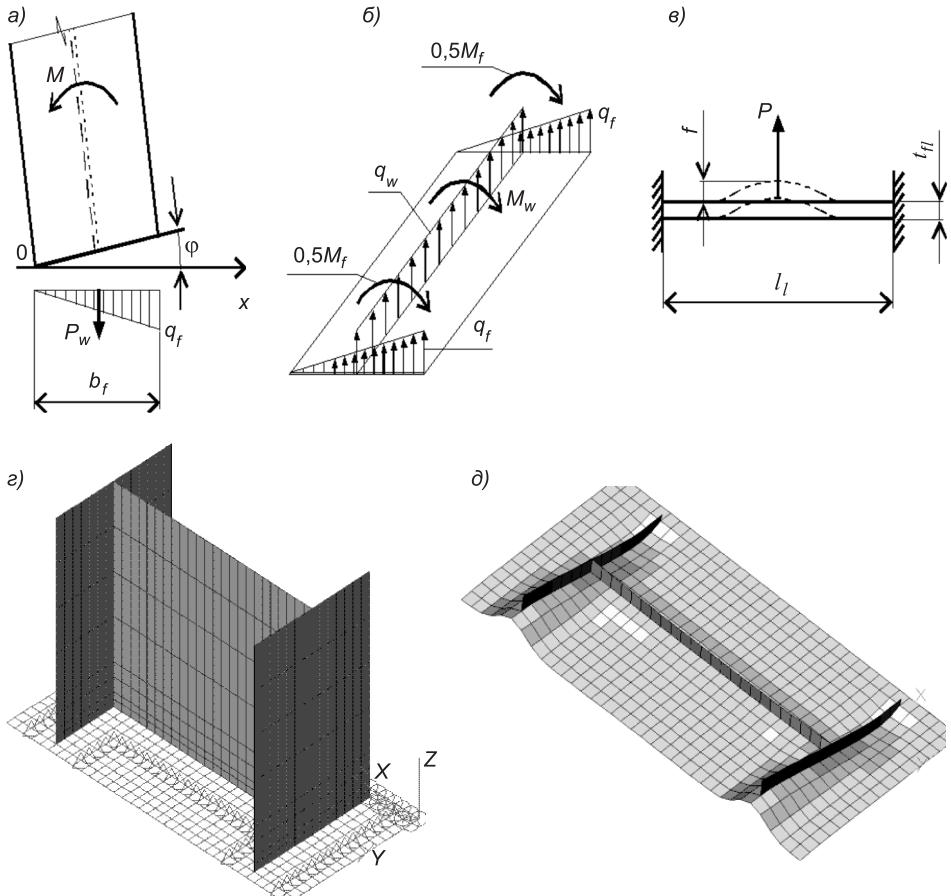


Рис. 2. Определение податливости фланцевого соединения из плоскости двутавра
а — поворот торца двутавра; б — эпюра реактивных усилий; в — расчетные схемы единичной полоски фланца; г — КЭ-модель фланцевого соединения колонны; д — деформации фланца

Для определения реактивных усилий рассмотрим деформации участка фланца единичной ширины, представляя его в виде балки, нагруженной сосредоточенной силой P и защемленной на опорах (см. рис. 2, в) [3]:

$$f = \frac{P\ell_i^3}{192E(1-\mu^2)J} = \frac{P}{16E(1-\mu^2)} \cdot \left(\frac{\ell_{fl}}{t_{fl}} \right)^3, \quad (6)$$

где ℓ_{fl} — расчетный пролет фланца поперек полки или стенки [3]; $J = t_{fl}^3 / 12$ — момент инерции единичной полоски фланца;

E, μ — модуль упругости и коэффициент Пуассона стали фланца.

Сила, необходимая для деформирования полоски на величину $f = 1$, равна

$$P = 16E(1-\mu^2) \left(\frac{t_{fl}}{\ell_{fl}} \right)^3 \cdot 1, \quad (7)$$

откуда определим максимальные реактивные усилия, действующие вдоль полок $q_{f\max}$ и стенки q_w :

$$q_{f\max} = 16E(1-\mu^2) \left(\frac{t_{fl}}{\ell_{fl}} \right)^3 b_f \varphi; \quad q_w = 16E(1-\mu^2) \left(\frac{t_{fl}}{\ell_{fl}} \right)^3 \frac{b_f}{2} \varphi. \quad (8)$$

Протяженность зоны действия реактивных усилий q_w примем равной ее высоте h_w за вычетом участков вблизи полок шириной по $0,5\ell_{fl}$ и получим

$$M_f = \frac{32}{3} E(1-\mu^2) \left(\frac{t_{fl} \cdot b_f}{\ell_{fl}} \right)^3 \varphi; \quad (9.1)$$

$$M_w = 4E(1-\mu^2) \left(\frac{t_{fl}}{\ell_{fl}} \right)^3 b_f^2 (h_w - \ell_{fl}) \varphi.$$

Жесткость фланцевого соединения участков вблизи полок и стенки найдем как значение момента при повороте узла на угол $\varphi = 1$, т.е.

$$C_{M_f} = M_f \Big|_{\varphi=1}; \quad C_{M_w} = M_w \Big|_{\varphi=1}. \quad (9.2)$$

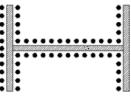
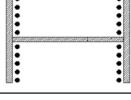
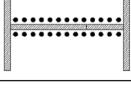
При $E = 2,06 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,3$ и одинаковых расчетных пролетах фланца поперек полки и стенки полная изгибная жесткость фланцевого соединения для различных случаев расстановки болтов будет равна

$$C_M = \beta(k_f C_{M_f} + k_w C_{M_w}) = 2,04 \cdot 10^6 \beta \left(\frac{t_{fl} b_f}{\ell_{fl}} \right)^3 \left(k_f + 0,37 k_w \frac{h_w - \ell_{fl}}{b_f} \right), \quad (10)$$

где $k_f = 1$ — при установке болтов с двух сторон полок;
 $k_f = 0,5$ — при установке болтов с одной стороны полок;
 $k_w = 1$ ($k_w = 0$) — при наличии (отсутствии) болтов вдоль стенки;
 $\beta \approx 0,6$ — корректирующий коэффициент, учитывающий смещение оси поворота соединения от края полки к стенке, податливость болтов и т.д. (согласно расчетам по МКЭ значение коэффициента β для реальных параметров фланцев находится в пределах $0,5 \div 0,6$).

В качестве примера рассмотрим шарнирно опертую стойку из двутавра 40Б2 длиной 6,5 м с фланцами толщиной $t_{fl} = 10$ мм и пролетом $\ell_{fl} = 90$ мм. Значения критических сил для различных случаев расстановки болтов приведены в таблице. Как видно из приведенных данных, при постановке болтов с одной стороны полок или только вдоль стенки возможно существенное снижение критической нагрузки (на 12–15 %) из-за повышенной податливости соединения, что должно быть учтено при проектировании.

Критическая сила для колонны с фланцевым соединением при различных способах расстановки болтов

Расстановка болтов	$\frac{k_f}{k_w}$	$\frac{C_M}{C_M}$	Расчетная формула	P_{cr} , кН
	1,0 1,0	$\frac{2,13 \cdot 10^7}{73,5}$	(1)	$\frac{438}{100 \%}$
	0,5 0	$\frac{8,34 \cdot 10^6}{28,9}$	(3)	$\frac{385}{88 \%}$
	0 1	$\frac{6,51 \cdot 10^6}{22,6}$	(3)	$\frac{375}{85 \%}$

Аналогичные расчеты могут быть выполнены и для случаев несимметричного расположения фланцевых соединений относительно стержней.

Для предотвращения отрицательного влияния податливости фланцевых соединений на устойчивость элементов необходимо принимать конструктивные меры по увеличению жесткости их соединений (расстановка болтов с двух сторон полок и вдоль стенки; увеличение толщины фланцев и т.д.) или путем установки вблизи фланцев связей, раскрепляющих элементы от потери устойчивости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А л ф у т о в , Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем [Текст] / Н.А. Алфутов. — М. : Машиностроение, 1978. — 309 с.
2. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81*) [Текст] / ЦНИИСК им. В.В. Кучеренко. — М. : ЦИТП, 1989. — 149 с.
3. К а т ю ш и н , В.В. Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения [Текст] / В.В. Катюшин. — М. : Стройиздат, 2005. — 606 с.

*КАТЮШИН Виктор Васильевич, канд. техн. наук, доц., президент научно-исследовательской и проектно-строительной фирмы УНИКОН
Кузбасский государственный технический университет, г. Кемерово*

Получено после доработки 18.06.12

Katushin Viktor Vasilievich, candidate of technical sciences, assistant professor, president of since and design firm UNICON, Kuzbass State Technical University, Kemerovo, Russia

ESTIMATION OF INFLUENCE FLANGE CONNECTIONS PLIABILITY ON SUSTAINABILITY BENDING OF CENTRALLY COMPRESSED STRUTS

There are considered the questions of yielding of flange connections as it influences on the stability of columns and frame elements. Also determined parameters of yielding of flange connections, analytically and numerically, under various arrangements of bolts and flange thickness. And also proposed practical calculations for evaluation of yielding of flange connections in determining the stability of these structures.

Key words: flange connections, yielding, stability.

REFERENCES

1. Alfutov, N.A. The stability of elastic systems. Basics of calculation [Text] / N.A. Alfutov. — M. : Mashinostroenie, 1978. — 309 p.
2. Manual for the design of steel structures (for SNIP II-23-81) [Text] / CRDISS named for V.V. Kucherenko. — M. : CITP, 1989. — 149 p.
3. Katyushin, V.V. Buildings with a frameworks made of steel frames with variable cross section [Text] / V.V. Katyushin. — M. : Stroyizdat, 2005. — 606 p.

УДК 624.014 : 539.2

Е.А. МОЙСЕЙЧИК, С.Д. ШАФРАЙ

О ДЕФОРМАЦИОННОМ ТЕПЛООБРАЗОВАНИИ В ЭЛЕМЕНТАХ СТАЛЬНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

В процессе холодного деформирования стального элемента вплоть до его разрушения установлено, что концентрация углерода в зоне излома и тепловыделение взаимосвязаны. Более высокий деформационный нагрев соответствует участкам с повышенным содержанием углерода. Приводятся данные эксперимента, уточняется механизм деформации элементов с дефектами. Даётся объяснение приспособляемости структуры стали в конструкции к условиям силонагружения.

Ключевые слова: напряжения, деформации, растяжение, сдвиг, дислокационное калирование, структура стали, твердофазная химическая реакция.

Поведение стали в строительных конструкциях, накопление дефектов в ее структуре, происходящих вплоть до разрушения при различных нагрузках конструктивно-технологических узлов (конструктивно-технологических форм — КТФ), является объектом внимания как практиков, так и ученых. Необходимо отметить, что природа так обо всем позаботилась, что любая система (техническая, биологическая и др.) будет стремиться выжить даже в экстремальных условиях. Тогда конструкция как система, априори имеющая различного рода дефекты (рис. 1), обусловленные как самой КТФ, так и материалом (в нашем случае это строительная сталь), должна сопротивляться разрушению даже в экстремальных условиях. В процессе деформирования сталь в нагруженном элементе будет в многоуровневом плане менять структурную составляющую, оказывая сопротивление разрушению, сопровождаемое тепловыделением. В этой связи тепловыделение облегчает образование новых структур (со своими прочностными характеристиками), которые в свою очередь способствуют дальнейшему повышению температуры. Итак, холодная деформация конструктивных элементов из сталей по мере перехода их от упругой к упругопластической, пластической работам и вплоть до разрушения сопровождается значительными структурными изменениями. Заметные трансформации проявляются в цементите пластинчатой формы, входящем в состав перлита стали: дробление, фрагментация, морфологические изменения, частичный распад цементита с переходом излишнего углерода в ферритную матрицу. При их деформировании в стали происходит изменение плотности и распределения дислокаций по объему материала, переходе ее глобулярной структуры в пластинчатую, а также другие физико-химические процессы, изменяющие сопротивляемость стального элемента воздействию нагрузок.

Цель настоящей работы состоит в выявлении распределения углерода и карбидов железа на участках с различными величинами деформации, примыкающих к зоне излома; установление их взаимосвязи с тепловыделением при деформировании под нагрузкой образцов из низкоуглеродистой строительной стали и уточнение механизма теплообразования в стальных элементах, в частности и тех, которые имеют концентраторы напряжений.

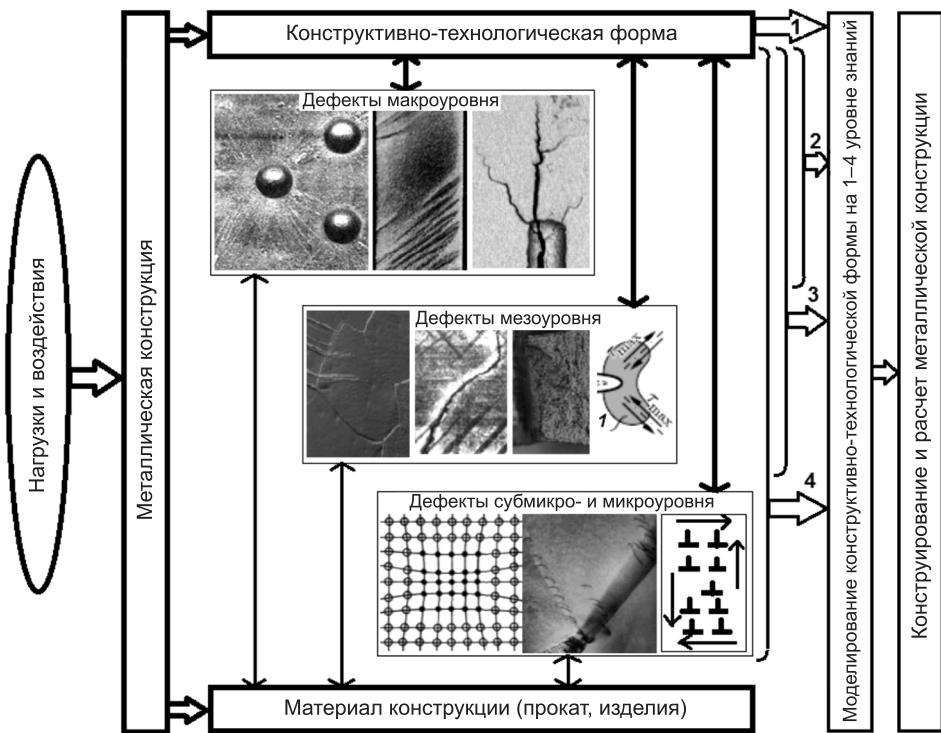


Рис. 1. Структурная схема конструктивно-технологической формы и уровни моделирования конструктивной прочности

Материал и методика исследований. Испытания на растяжение были проведены на плоских стандартных образцах квадратного сечения 3×3 мм с длиной рабочей части 56 мм, вырезанных из листового проката из стали Ст3сп (ГОСТ 380–2005). Элементный состав стали: С — 0,15–0,21 %, Mn — 0,45–0,50 %, Ni — 0,02–0,11 %, Cr — 0,06–0,26 %, Si — 0,24–0,26 %, Fe — основа. Анализ на углерод проводили на экспресс-анализаторе АН 7529. Для исследования структуры использовался световой микроскоп «МеF-3» фирмы «Reichert» (Австрия) при увеличениях $\times 100$, $\times 200$, $\times 500$ по ГОСТ 8233–56. Нагружение образцов выполняли в соответствии с ГОСТ 1497–84 на универсальной испытательной машине «Instron 1195». Средние механические характеристики 14 испытанных образцов составляли временное сопротивление $\sigma_b = 443$ МПа, предел текучести $\sigma_y = 265$ МПа, а относительное удлинение $\gamma = 17$ %. Изменение микроструктуры при деформировании одного из образцов показано на рис. 2. Изменение структуры стали в процессе деформирования указывает на то, что материал стремится приспособиться к условиям нагружения, выстраивая ферритные и цементитные пластины вдоль растягивающих напряжений σ с тем, чтобы воспрепятствовать развитию разрушения по оси Y (рис. 2, б, в).

Микроструктура образцов до деформирования феррито-перлитная со строчечной полосчатостью 1 балл по шкале Б; в зоне разрыва 0,1 мм от края разрыва — строчечная феррито-перлитная, полосчатость 4 балла по шкале Б с вытянутыми вдоль линии разрыва зернами. Исследование морфологии образцов проводили на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения «Mira» фирмы «Tescan» (Чехия), а элементного состава велось с помощью микрорентгеноспектрального анализатора «INCA 350» фирмы «Oxford Instruments» (Англия).

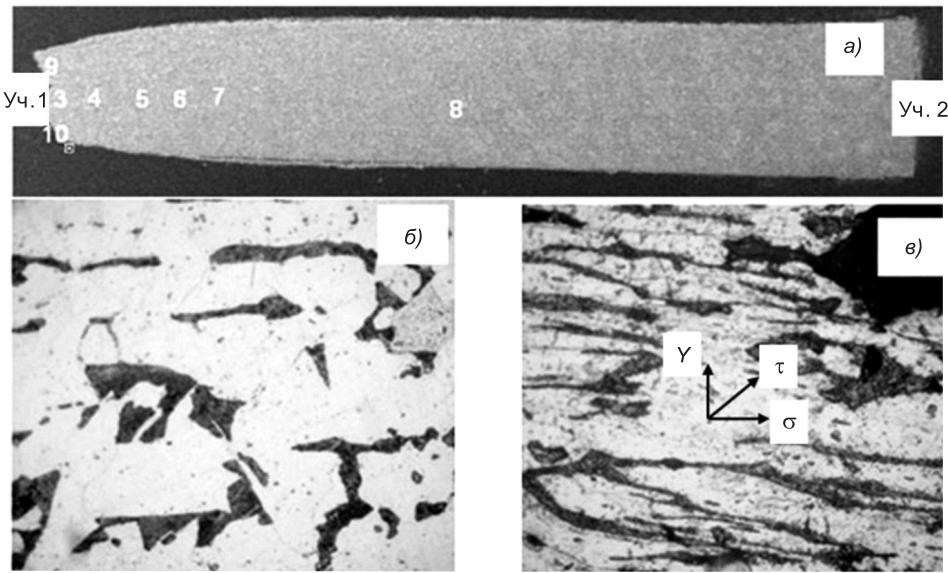


Рис. 2. Схема расположения участков анализа стандартного образца (а); микроструктура стандартного образца до деформирования (б); после разрушения у излома (в)

Результаты испытаний. Элементный состав стандартного образца после разрушения исследовали в точках, расположенных у излома, и в точках, расположенных на ненагруженных участках (см. рис. 2, а). Распределение углерода вдоль оси образца определялось по данным спектро-графических измерений на участках 1–10 (см. рис. 2, а). Участки 3–8 расположены один от другого на расстояниях: 3–4 (0,5 мм), 4–5 (0,5 мм), 5–6 (1,5 мм), 6–7 (2,0 мм), 7–8 (5,0 мм). Из рис. 3 следует, что рост концентрации углерода по линии от участка 1–2 происходит в пределах шейки. При этом в зоне излома (участок 1) количество углерода превышает содержание углерода в средней части образца (участок 8, равномерное деформирование) примерно на 17–21 %. В средней части излома (участок 1) содержание углерода примерно в 2 раза выше, чем в крайних частях (участки 9, 10). Сужение рабочей части стандартного образца (участки 6–8) составило 12–17 %. Данные микрорентгеноспектрального анализа показывают, что углерод в основном находится в феррито-перлитных колониях, на границах зерен. Концентрация углерода на феррито-перлитных участках равномерного деформирования рабочей зоны образца (участки 6–8) примерно одинакова. Подобной является и его концентрация на таких же участках в зоне «шейки». Концентрация углерода, распределенного в ферритных составляющих стали, примерно одинакова на всех участках образца и значительно ниже его содержания в других

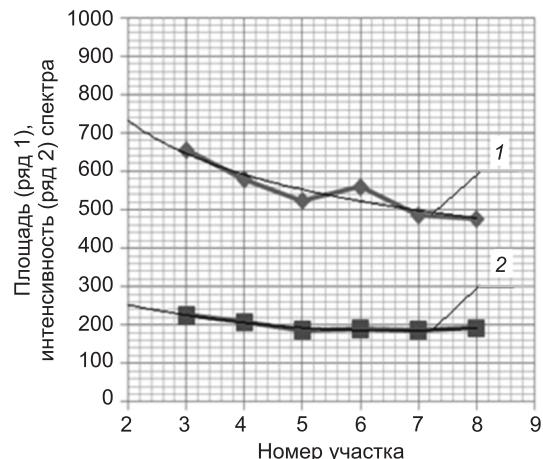


Рис. 3. Изменение содержания углерода по участкам (см. рис. 2, а) рабочей зоны исследуемого образца (площадь и интенсивность спектра приведены в безразмерных величинах)

структурных составляющих. На участках 1–10 выделяются полосы локализованных относительной деформации материала. Полосы расположены под углом 40–50° относительно направления сдвигов, плотность которых растет с увеличением деформационного потока. При этом заметно, что полосы сдвига пересекают и феррито-перлитные образования, которые разделяются на более мелкие составляющие, смещаемые и разворачиваемые по направлению потока деформирования. В результате такой «обработки» феррито-перлитные участки становятся вытянутыми и ориентированными по направлению деформационного потока, а расстояние между феррито-перлитными составляющими уменьшается. Так, в зоне излома это расстояние примерно в 2 раза ниже, чем на участках равномерной деформации. При деформировании образца в его теле образуются и развиваются поры и полости. Расположены они в ферритных составляющих, на пограничных с перлитными компонентами участках и имеют преимущественно вытянутую по направлению деформационного потока форму. Марганец и железо относительно равномерно распределены по объему образца. По отсутствию элементов на отдельных участках можно уверенно считать эти участки как поры. Отдельные поры расположены в феррито-перлитных зернах. Повышения содержания углерода на поверхностях пор примененными приборами не зафиксировано.

Механохимические процессы в стали. В работе [1] обобщены результаты исследований различных авторов, свидетельствующих о том, что пластическая деформация стали инициирует нестабильное состояние цементита и его частичный распад. Здесь с использованием различных физических методов исследования установлено, что при пластической деформации происходят распад до 50 % карбидной фазы стали и существенные изменения в составе карбидной фазы. Углерод, диффундирующий в феррит при распаде цементита, может существовать в двух состояниях: в форме сегрегаций в дислокационных скоплениях и в виде атомарного углерода в микродефектах. Деформирование стали приводит к растворению кристаллов цементита и других углеродсодержащих фаз. В [2] приводятся экспериментальные данные исследований перераспределения содержания атомов углерода в процессе зарождения и роста трещины при деформировании знакопеременным изгибом образца из феррито-перлитной стали при комнатной температуре. Сопоставляя данные на различных стадиях развития повреждений структурных составляющих стали с соответствующими исходными, авторы [2] выявили, что в окрестности трещины происходит растворение кристаллов цементита, в результате чего углерод располагается в позициях внедрения ОЦК-решетки, на дефектах решетки α -фазы (вакансии и их комплексы, дислокации, субградиенты и границы), в микропорах и микротрещинах. Растворение цементита сопровождается и незначительным формированием новых железоуглеродистых соединений (Fe_7C_3 , $Fe_{20}C_9$). В отдельных случаях образуется графит, откладываемый на микротрещинах. Углерод к микротрещинам переносится в ядрах движущихся дислокаций. Установлено, что перемещение атомов внедрения (углерод, азот) к дефектам сопровождается значительным выделением тепла и уменьшением удельного объема стали [2]. Сопоставление графиков распределения углерода (см. рис. 3) с изменением температуры образца при деформировании стандартных образцов [3] и стальных стержней натуральных размеров [4] при их растяжении с учетом выделенных литературных данных подтверждает физико-химическую природу процесса теплообразования при деформировании элементов стальных строительных конструкций.

Рассмотренные выше данные позволяют выделить следующие особенности теплообразования в стали, связанные с особой ролью углерода в этом процессе. Избыточные атомы углерода скапливаются в основном на межфазных феррито-цементитных границах и образуют упругие атомно-дислокационные образования атмосферы. Они возникают вокруг краевых дислокаций, развитие которых связано с касательными компонентами напряжений. На начальной стадии эти образования (атмосферы Котрелла) тормозят движение дислокаций. Но выделяющееся в результате физико-химического взаимодействия атомов внедрения и дислокаций тепло приводит к распаду атомно-дислокационных образований.

Энергия связи углерода в решетке цементита составляет $0,64 \cdot 10^{-19}$ Дж, а энергия связи с краевой дислокацией при температуре 20°C равна $(0,8-1,6) \cdot 10^{-19}$ Дж [2]. Высокая концентрация атомно-дислокационных образований на межфазных границах и их температурная зависимость вызывают частичный распад образований и переход углерода на карбидные частицы [2]. При температуре 225°C ослабляется связь дислокаций с углеродом, а при температуре выше 400°C происходит интенсивное восстановление разложившегося при деформации цементита. При переходе атомарного углерода с дислокации в цементитную fazу выделяется заметное количество тепла, приводящего к всплеску температуры в окрестности сдвиговой деформации в зернах стали. При статическом нагружении изменение плотности дислокаций $\Delta\rho$ в деформируемом объеме прямо пропорционально истинной деформации e :

$$\Delta\rho = \rho - \rho_0 = Ae, \quad (1)$$

где ρ, ρ_0 — соответственно текущее и начальное значение плотности дислокаций;

A — коэффициент пропорциональности для поликристаллов, имеющий порядок величины 10^{15} м^{-2} .

Тогда с позиций теории дислокации следует ожидать, что рост температуры в деформируемом объеме будет определяться величиной $\Delta\rho$, т.е. зависимость «температура — удлинение» должна быть на участках равномерной деформации, близкой к линейной, что подтверждается данными прямых измерений [3, 4]. Выделение (поглощение) тепла можно рассматривать как результат твердофазного физико-химического взаимодействия между дислокациями и атомами (ионами) углерода, происходящего на границе раздела faz. Такое взаимодействие представим в форме реакции, протекающей в соответствии с выражением



где A_m — дислокационный компонент, обладающий достаточной подвижностью;

B_m — атомный (ионный) компонент;

AB_m — атомно-дислокационное соединение.

Направление реакции (2) зависит от ряда факторов: величины, направления и скорости сдвиговых деформаций; температуры; наличия атомов других элементов, в том числе легирующих в реакционной зоне. Воз действие напряжений на константу скорости реакции k описывается уравнением Эйринга–Козмана

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E_a - \sigma_a V_a}{RT}\right), \quad (3)$$

где k_0 и E_a — предэкспоненциальный множитель и энергия активации термического распада;

$\sigma_a V_a$ — работа, производимая в процессе реакции над активационным объемом упругими напряжениями (σ_a — напряжение, V_a — активационный объем);

R — универсальная газовая постоянная;

T — абсолютная температура.

Данные компьютерной термографии плоского образца из стали СтЗсп с тремя парами боковых надрезов, приведенные на рис. 4 и определенные по методике [4], показывают, что реакция (1) в растянутой пластине из стали Ст 3 протекает не во всем деформируемом объеме, а по отдельным направлениям AB , CD , на которых действуют наибольшие касательные

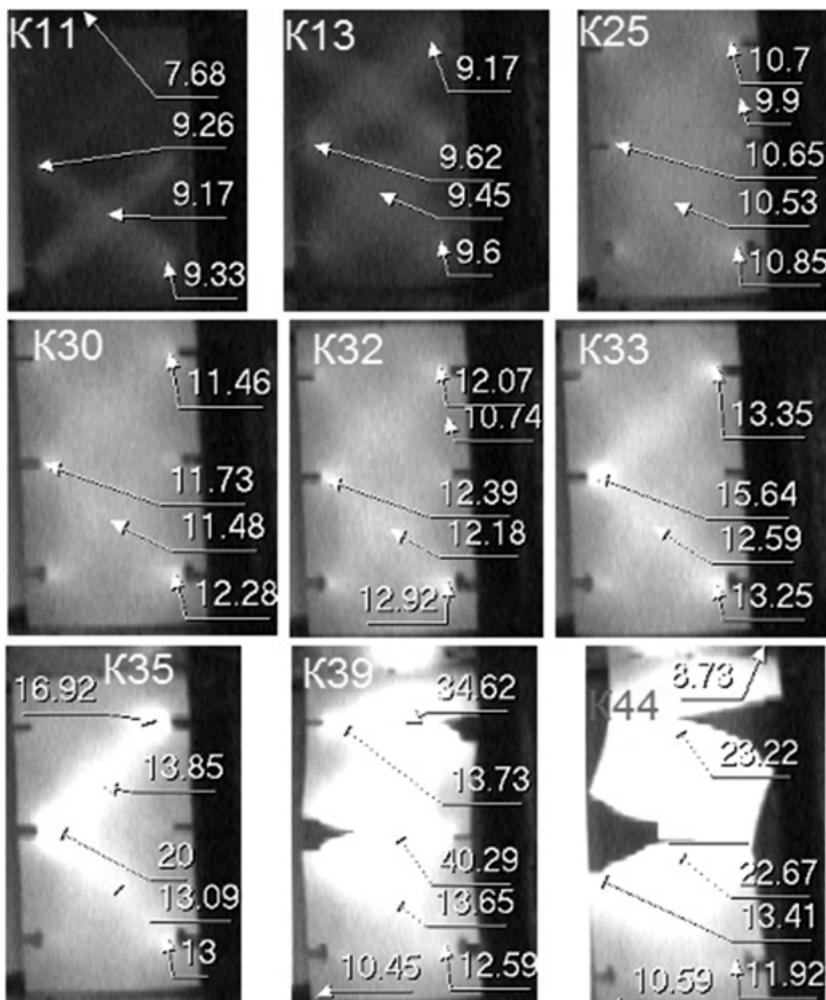


Рис. 4. Данные компьютерной термографии растяжения образца толщиной 6 мм с двусторонними надрезами (радиусы кривизны надрезов: нижний ряд — 9 мм; средний — 6; верхний — 3 мм; расстояние от боковой кромки до центра отверстия 14 мм)

Данные по кадрам — K11: $T_{\max} = 9,63$ °C, $T_{\min} = 7,59$ °C, $\theta = 25,6$ с; K13: $T_{\max} = 9,85$ °C, $T_{\min} = 7,97$ °C, $\theta = 30,3$ с; K25: $T_{\max} = 11,28$ °C, $T_{\min} = 8,54$ °C, $\theta = 58,2$ с; K30: $T_{\max} = 12,59$ °C, $T_{\min} = 9,19$ °C, $\theta = 69,8$ с; K32: $T_{\max} = 13,02$ °C, $T_{\min} = 10,25$ °C, $\theta = 74,5$ с; K33: $T_{\max} = 15,64$ °C, $T_{\min} = 10,4$ °C; $\theta = 76,8$ с; K35: $T_{\max} = 20,11$ °C, $T_{\min} = 10,23$ °C, $\theta = 81,5$ с; K39: $T_{\max} = 45,25$ °C, $T_{\min} = 10,44$ °C, $\theta = 90,8$ с; K44: $T_{\max} = 25,22$ °C, $T_{\min} = 10,61$ °C, $\theta = 102,4$ с. Температура воздуха $T_B = 7,58$ °C

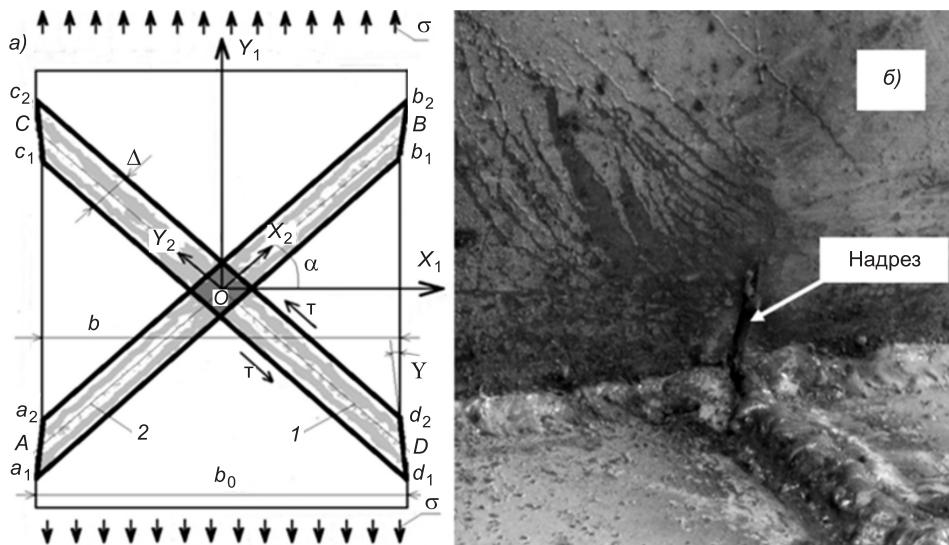


Рис. 5. Схема расположения полос скольжения при растяжении плоского образца (а); искусственное изменение структуры стали (появление линий Чернова–Людерса) у надреза в 24-метровой стальной балке по серии 1.420.3.38.07 «Каркасы стальные “УНИКОН-ПК1”», произошедшей после ее предварительного нагружения (б)

напряжения τ (рис. 5, а). Полосы $a_1a_2b_2b_1$ зарождались от надрезов (макрорефектов), расположенных в точках A, B, C, D . При этом одна из отмеченных полос сдвига обычно проявлялась раньше другой. Зарождение полосы происходило у одного из надрезов (точки A, B, C, D) и быстро (скорость не менее 0,1 м/с) распространялось вдоль оси полосы сдвига. Температура деформированного металла полосы была заметно выше, чем в смежных зонах [4]. Более высокое повышение температуры отмечалось в зоне пересечения двух полос скольжения AB, CD . После такого ограниченного шириной полосы сдвига Δ всплеска температуры, как правило, следовало разрушение полосы сколом. Клинообразные области, примыкающие к полосам сдвига, например, d_2ad_1 , находились в упругом состоянии и смещались полосами скольжения к началу координат так, что после разрушения образца выполнялось условие $b_0 > b$.

В изложенном опыте можно отметить два момента. 1. В пластической области в окрестности надреза (дефекта) образовывался начальный зародыш, в котором при достижении предельной для данного зародыша температуры поверхности металла зарождалась магистральная трещина. При движении этой трещины в пределах полосы сдвига температура поверхности повышалась. 2. Это вышеотмеченный температурный всплеск и его быстрое движение вдоль полосы сдвига. Видимо, эти особенности теплообразования объясняются тем, что твердофазные химические процессы протекают в несколько этапов и зарождаются, как правило, на участках, где кристаллические решетки разрыхлены дефектами строения. Такие дефекты упаковки в фрагментированном при деформации цементите имеются в большом количестве. В дефектных местах возникают зародыши. Первоначальные зародыши, определяющие топологию канализирования, возникают в пластической зоне у поверхностных надрезов, мест резкого изменения формы образца, элемента, а затем происходит образование и развитие зародышей по траектории действия максимальных касательных напряжений. Транспортирование реагирующих компонент к зародышу, т.е. к месту протекания собственно химического взаимодействия, осуществляется различными диффузионными механизмами.

В эксперименте на образцах с надрезами наблюдалась «прострелы» тепловой волны вдоль линий AB , CD (см. рис. 4, 5, a). Объяснений указанному явлению в литературных источниках не выявлено. Характерными чертами его является неоднородное развитие пластической деформации по объему деформируемого образца и высокая скорость распространения тепловой волны по направлениям действия максимальных касательных напряжений в стальном образце. При этом материал образца, расположенный вне полос скольжения, остается не вовлеченным в процесс деформирования. По-видимому, по указанным направлениям возникает дислокационное канализирование. Это явление отмечено как при упругом, так и при упругопластическом деформировании. При пластическом деформировании определяется тот канал, в котором зарождается магистральная трещина и проходит ее начальное движение. В заключение приведем практический прием искусственного изменения структуры стали вокруг локального дефекта (надреза) в стенке (толщина 8 мм) сплошно-стенчатой двутавровой 24-метровой стальной балки, выполненной по серии 1.420.3.38.07 «Каркасы стальные “УНИКОН-РК1”». Балка была подвергнута динамическому нагружению, путем резкого опускания ее краем на деревянные подкладки. При таком нагружении нормальные напряжения в нижней полке балки по расчету не превышали расчетного сопротивления стали по пределу текучести. В образовавшейся пластической зоне (см. рис. 5, b) произошла не только релаксация пиков напряжения, но и изменение самой структуры стали, которая согласно проведенным исследованиям приобрела пластичный характер (см. рис. 2, b). Такой прием предварительного нагружения стальной конструкции значительно повышает ее «хладостойкость».

Выводы. 1. В стальных образцах при холодном деформировании развиваются полосы локализованных сдвигов, плотность которых растет с увеличением относительной деформации материала. Полосы расположены под углом $40\text{--}50^\circ$ относительно направления деформационного потока.

2. Углерод на деформированных участках образцов распределен во всех составляющих стали. Основная его доля находится в феррито-перлитных колониях, на границах зерен. С увеличением пластической деформации стали образцов увеличивается содержание несвязанного углерода на таких участках. При этом основную часть роста доли углерода дает повышение плотности углеродсодержащих структурных составляющих стали на деформированных участках образцов.

3. Сопоставление диаграмм растяжения образцов с кривыми изменения температуры по длине образца и графиками распределения углерода в деформированном образце позволяет допускать, что основной причиной деформационного теплообразования являются физико-химические процессы в полосах скольжения, предопределенные взаимодействием углерода с дислокациями и структурными составляющими стали в процессе пластического деформирования.

4. Деформирование надрезанных листовых образцов характеризуется неоднородным развитием пластической деформации по объему образца и высокой скоростью распространения тепловой волны по направлениям действия максимальных касательных напряжений в стальном образце. При этом материал образца, расположенный вне полос скольжения, остается не вовлеченным в процесс деформирования. По-видимому, по указанным направлениям распространение тепловой волны связано с дислокационным канализированием.

5. Предварительное нагружение стальных конструкций с развитием пластических деформаций у концентраторов напряжения приводит к про-

явлению эффекта изменения структуры стали и повышению сопротивляемости особенно хрупкому разрушению при низких температурах эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаврилюк, В.Г. Распределение углерода в стали [Текст] / В.Г. Гаврилюк. — Киев : Наук. думка, 1987. — 208 с.
2. Соснин, О.В. Эволюция структуры и перенос атомов углерода в зоне усталостного роста трещины феррито-перлитной стали [Текст] / О.В. Соснин, В.В. Целлермаер, Ю.Ф. Иванов, В.Е. Громов, Э.В. Козлов // Изв. вузов. Физика. — 2003. — № 10. — С. 79–87.
3. Иванов, А.М. Исследование развития пластических деформаций сталей методом теплового излучения [Текст] / А.М. Иванов, Е.С. Лукин // Материаловедение. — 2003. — № 6(75). — С. 27–31.
4. Мойсейчик, Е.А. Деформационное теплообразование при растяжении стальных образцов с конструктивно-технологическими дефектами [Текст] / Е.А. Мойсейчик // Вопросы атомной науки и техники. — 2011. — № 4. — С. 188–195.

МОЙСЕЙЧИК Евгений Алексеевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: emoisseitchik@mail.ru

ОАО «Стройтрансгаз», г. Москва

ШАФРАЙ Сергея Дмитриевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: shafray.sd@yandex.ru

Новосибирская государственная архитектурно-художественная академия

Получено после доработки 17.05.12

Moisseitchik Evgeniy Alexeevich, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: emoisseitchik@mail.ru, «Stroytransgas», Moscow, Russia

Shafray Sergey Dmitrievich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: shafray.sd@yandex.ru, Novosibirsk State Academy of Architecture and Art, Russia

ON THE DEFORMATION OF STEEL HEAT BUILDUP IN THE CONSTRUCTION OF CARBON STEEL

On the basis of experimental data on the distribution of carbon in the deformed sample indicates that the processes of heat generation and distribution of carbon interconnected. The higher the strain corresponds to the heating areas with high carbon content. We present experimental data on the deformation heat buildup in the stretched sample with a flat side cuts and clarifies the mechanism of deformation and heat generation in the elements of design and technological defects.

Key words: stress, deformation, tension, shear, dislocation channeling, steel structures, solid-phase chemical reaction.

REFERENCES

1. Gavrilyuk, V.G. The distribution of carbon steel [Text] / V.G. Gavrilyuk. — Kiev : Nauk. dumka, 1987. — 208 p.
2. Sosnin, O.V. The evolution of the structure and the transfer of carbon atoms in the zone of fatigue crack growth ferrite-pearlite steel [Text] / O.V. Sosnin, V.V. Tsellermaer, Yu.F. Ivanov, V.E. Gromov, E.V. Kozlov // Proceedings of the higher education institutions. Fizika. — 2003. — N 10. — P. 79–87.
3. Ivanov, A.M. The study of plastic deformation of steels by thermal radiation [Text] / A.M. Ivanov, E.S. Lukin // Materialovedenie. — 2003. — N 6 (75). — P. 27–31.
4. Moisseitchik, E.A. Strain heat buildup in tension steel specimens with defects in design and technology [Text] / E.A. Moisseitchik // Problems of atomic science and technology. — 2011. — N 4. — P. 188–195.

УДК 666.9.022.3

А.А. РОМАНОВИЧ

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПОДАЧИ АНИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРЕСС-ВАЛКОВЫЙ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ

На основе классического положения механики зернистых сред исследовано предварительное уплотнение шихты и получено аналитическое выражение для расчета усилия ее предуплотнения со стороны уплотняющих валков.

Ключевые слова: усилия предуплотнения, энергосберегающее оборудование, анизотропные материалы, пресс-валковый измельчитель.

Современная строительная индустрия базируется на переработке огромного количества нерудных материалов с различным минералогическим составом и физико-механическими свойствами (глин, песков, известняков, гранитов, базальтов и др.). При этом их измельчение сопровождается значительными материальными и энергетическими затратами.

Известно, что около 10 % всей мировой электроэнергии расходуется на процессы дробления и помола. При этом все возрастающие потребности в переработке природного сырья для создания новых строительных материалов и смесей, а также необходимость утилизации техногенных отвалов и отходов различных производств потребуют еще больших затрат электроэнергии на измельчение.

Большинство железорудных месторождений, на которых осуществляется добыча полезных ископаемых открытым способом, содержат подлежащие переработке отвалы из попутно добываемых пород, загрязняющих окружающую среду, выводящих из сельхозоборота плодородные почвы и требующих значительных материальных затрат на их содержание. Только на месторождениях КМА их объем составляет около 1 млрд м³.

Указанные обстоятельства определяют большое внимание ученых и практиков к развитию технологии их переработки и конструктивному совершенствованию дробильно-помольного оборудования.

Особое место в этом ряду занимают технология и оборудование для измельчения материалов, имеющих анизотропную структуру и характеризующихся различными физико-механическими параметрами среды.

Многочисленные исследования ученых подтверждают прямую зависимость коэффициента анизотропии $K_{\text{ан}}$:

$$K_{\text{ан}} = \frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_{\parallel}}, \text{ где } \sigma_{\perp}, \sigma_{\parallel} — \text{ соответственно предел прочности анизотроп-}$$

ного материала в направлении, перпендикулярном слоистости минерала, и предел прочности материала в направлении, параллельном слоистости минералов (см. таблицу).

При дроблении анизотропных горных пород эффективность процесса разрушения определяется многими факторами: прочностными характеристиками материалов, их структурно-текстурными признаками и, главное, способом и направлением приложения разрушающих усилий.

Наименование материала	Предел прочности при сжатии, МПа		Коэффициент анизотропии
	перпендикулярно сланцеватости	параллельно сланцеватости	
Известняки органогенные	95	65	1,46
Метаморфические сланцы (месторождение КМА)	130	59	2,2
Амфиболиты (месторождение КМА)	145	75	1,93
Кварцитопесчаники полосчатые	260	190	1,37

Анализ научно-технических исследований процессов разрушения изотропных и анизотропных материалов в различных дробильно-помольных агрегатах показывает, что при организации процесса измельчения анизотропных материалов необходимо учитывать не только их специфические особенности, но и условия организации самого процесса:

- условия загрузки материалов с анизотропной структурой и направленного их движения;
- направления приложения силовой нагрузки;
- технологические схемы организации процессов измельчения материалов на каждой стадии их переработки (классификация измельченных продуктов, внутренний и внешний рецикл измельчаемых материалов и др.).

В связи с этим особая актуальность возникает в направленном и равномерном питании агрегатов, используемых для разрушения материалов, имеющих анизотропную структуру, так как создается возможность обеспечения направленного силового воздействия на измельчаемый материал в направлении его наименьшей прочности, что позволит значительно снизить энергозатраты на измельчение.

Существующий парк дробильного оборудования на сегодня как у нас в стране, так и за рубежом не учитывает или слабо приспособлен к учету особенностей измельчаемого сырья.

Проведенный анализ условий истечения шихты и ее измельчение сжатием в пресс-валковых агрегатах¹ свидетельствует о целесообразности использования питающего устройства валкового типа, которое обеспечивает равномерное распределение слоя шихты по ширине рабочих органов ПВИ, эффективное ее предуплотнение и направленную подачу слоя материала в межвалковое пространство. Однако отсутствие научно обоснованной методики расчета усилия предуплотнения материалов в валковом устройстве препятствует его внедрению в производство.

Рассмотрим условия предуплотнения и равномерного распределения шихты в ПВИ с валковым устройством (рис. 1).

Введем следующие обозначения:

$R_b, r_{b,p}$ — соответственно радиус валков ПВИ и предуплотнителя, м;

b, B — ширина валка предуплотнителя и измельчителя, м;

$H_{0,сл}$ — исходная толщина слоя шихты, м;

$H_{0,упл}$ — исходная толщина уплотняемого слоя шихты, м;

$h_{упл,сл}$ — толщина уплотненного слоя шихты, м;

$\alpha_{пр.упл}$ — угол предварительного уплотнения слоя шихты, град.;

$\bar{P}_{упл}$ — давление уплотнения со стороны валка предуплотнителя, Н/м²;

$P_{сдв}$ — сопротивление сдвиговому деформированию слоя шихты, Н·с/м²;

¹ Дерисевич Г.А. Механика зернистой среды // Проблемы механики. Л., 1961. Вып. 3. С. 91.

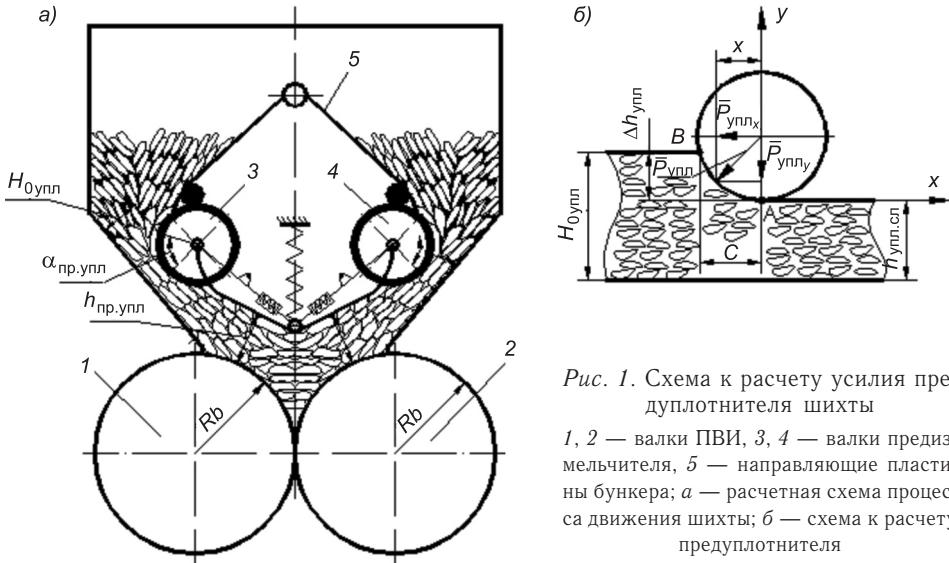


Рис. 1. Схема к расчету усилия предуплотнителя шихты
1, 2 — валки ПВИ, 3, 4 — валки предзмельчителя, 5 — направляющие пластины бункера; а — расчетная схема процесса движения шихты; б — схема к расчету предуплотнителя

$\Delta h_{\text{упл}}$ — величина уплотнения слоя шихты, м;
 a — расстояние от центра валка предуплотнителя до крайней точки уплотняемого слоя (начала уплотнения), м;
 $v_b, v_{b,y}$ — соответственно окружная скорость валка ПВИ и предуплотнителя, м/с.

При исследовании условий деформации и движения уплотняемой шихты использовались классические положения механики зернистых сред, а именно предварительное уплотнение шихты характеризуется скоростью деформации частиц² [2, 3]:

$$v_{\text{деф.}x} = \frac{1}{P_{\text{сдв}}} \frac{\partial P_{\text{упл}}}{\partial x} \frac{1}{2} y^2 + C_1 y + C_2, \quad (1)$$

откуда определяем $P_{\text{сдв}}$ — сопротивление сдвиговому деформированию слоя анизотропных тел

$$P_{\text{сдв}} = k_{\text{пр}} \frac{\bar{P}_{\text{пред}} t}{47 \sqrt{v}}, \quad (2)$$

где $k_{\text{пр}}$ — коэффициент пропорциональности, для хрупких тел $k_{\text{пр}} = 0,1 \div 0,15$;

$\bar{P}_{\text{пред}}$ — предельное давление, при котором происходит разрушение слоя деформируемых тел, Н/м²;

t — время деформирования слоя, с;

v — поправка энергетического критерия Губера-Мизеса-Генки, характеризующая отношение предела прочности хрупкого тела при растяжении $\sigma_{\text{раст}}$ к пределу прочности при сжатии $\sigma_{\text{сж}}$. Для анизотропных хрупких тел $v \ll 1$, так как $\sigma_{\text{раст}} = 10^{-2} E$ (E — модуль упругости деформируемого тела).

Для решения интересующего нас случая в (1) предполагаем

$$C_2 = 0; \quad C_1 = \frac{\omega}{H_{0\text{упл}}} (H_{0\text{упл}} - h_{\text{упл.сл}}) - \frac{1}{P_{\text{сдв}}} \frac{\partial \bar{P}_{\text{упл}}}{\partial x} \frac{H_{0\text{упл.сл}}}{2}, \quad (3)$$

где ω — угловая скорость валка предуплотнителя, рад/с.

² Ландау Е.М., Лившиц Э.Л. Механика сплошных сред. М.: Гостехиздат, 1954. 795 с.

С учетом (3) уравнение (1) примет вид

$$v_{\text{деф.}x} = \frac{1}{2P_{\text{сдв}}} \frac{\partial \bar{P}_{\text{упл}}}{\partial x} y^2 + \omega \left(1 - \frac{h_{\text{упл.сл}}}{H_{0\text{упл}}} \right) y - \frac{h_{\text{упл.сл}}}{2P_{\text{сдв}}} \frac{\partial \bar{P}_{\text{упл}}}{\partial x} y.$$

После преобразования получаем

$$v_{\text{деф.}x} = \frac{1}{2P_{\text{сдв}}} \frac{\partial \bar{P}_{\text{упл}}}{\partial x} (y^2 - H_{0\text{упл}} y) + \omega y \left(1 - \frac{h_{\text{упл.сл}}}{H_{0\text{упл}}} \right). \quad (4)$$

Для определения второй составляющей скорости частиц при их уплотнении воспользуемся известным уравнением непрерывности

$$\frac{\partial v_{\text{деф.}x}}{\partial x} + \frac{\partial v_{\text{деф.}y}}{\partial y} = 0. \quad (5)$$

Продифференцируем соотношение (4) по X :

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_{\text{деф.}x}}{\partial x} &= \frac{1}{2P_{\text{сдв}}} \left[\frac{\partial^2 \bar{P}_{\text{упл}}}{\partial x^2} (y^2 - H_{0\text{упл}} y) + \frac{\partial \bar{P}_{\text{упл}}}{\partial x} \left(-y \frac{dH_{0\text{упл}}}{dx} \right) \right] + \\ &\quad + \omega y \left(\frac{h_{\text{упл.сл}}}{H_{0\text{упл}}} \frac{dH_{0\text{упл}}}{dx} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Согласно расчетной схеме, представленной на рис 1, б, находим

$$H_{0\text{упл}} = h_{\text{упл.сл}} + \Delta h_y, \quad \Delta h_y = r_{\text{в.п}} - y = r_{\text{в.п}} - \sqrt{r_{\text{в.п}}^2 - x^2}, \quad \text{тогда}$$

$$\frac{dH_{0\text{упл}}}{dx} = \frac{x}{\sqrt{r_{\text{в.п}}^2 - x^2}}. \quad (7)$$

Подставляя выражение (6) с учетом (7) в равенство (5), получим

$$\begin{aligned} \frac{1}{2P_{\text{сдв}}} \left[\frac{\partial^2 \bar{P}_{\text{упл}}}{\partial x^2} (y^2 - H_{0\text{упл}} y) - \frac{\partial \bar{P}_{\text{упл}}}{\partial x} y \frac{x}{\sqrt{r_{\text{в.п}}^2 - x^2}} \right] + \\ + \omega y \frac{h_{\text{упл.сл}}}{H_{0\text{упл}}^2} \frac{x}{\sqrt{r_{\text{в.п}}^2 - x^2}} + \frac{\partial v_{\text{деф.}y}}{\partial y} = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

После преобразований и интегрирования по переменной « y » уравнение (8) примет вид:

$$\begin{aligned} v_{\text{деф.}y} &= \frac{-1}{2P_{\text{сдв}}} \left[\frac{\partial^2 \bar{P}_{\text{упл}}}{\partial x^2} \left(\frac{y^3}{3} - H_{0\text{упл}} \frac{y^2}{2} \right) - \frac{\partial \bar{P}_{\text{упл}}}{\partial x} \frac{y^2}{2} \frac{x}{\sqrt{r_{\text{в.п}}^2 - x^2}} \right] - \\ &\quad - \frac{\omega y^2}{2} \frac{h_{\text{упл.сл}}}{H_{0\text{упл}}^2} \frac{x}{\sqrt{r_{\text{в.п}}^2 - x^2}} + C. \end{aligned} \quad (9)$$

Решая уравнение (9) при $C = 0$, $y = H_{0\text{упл}}$, $v_{\text{деф.}y} = -\omega x$, получим

$$\begin{aligned} \omega x &= \frac{1}{2P_{\text{сдв}}} \left[\frac{\partial^2 \bar{P}_{\text{упл}}}{\partial x^2} \left(\frac{H_{0\text{упл}}^3}{3} - \frac{H_{0\text{упл}}^3}{2} \right) - \frac{\partial \bar{P}_{\text{упл}}}{\partial x} \frac{H_{0\text{упл}}^2}{2} \frac{x}{\sqrt{r_{\text{в.п}}^2 - x^2}} \right] + \\ &\quad + \frac{\omega H_{0\text{упл}}^2}{2} \frac{h_{\text{упл.сл}}}{H_{0\text{упл}}^2} \frac{x}{\sqrt{r_{\text{в.п}}^2 - x^2}}. \end{aligned} \quad (10)$$

После соответствующих преобразований и полагая, что $\frac{\partial \bar{P}_{\text{упл}}}{\partial x} = \alpha_{\text{пр.упл}}$, получим дифференциальное уравнение от функции $\alpha_{\text{пр.упл}}$

$$\frac{\partial \alpha_{\text{пр.упл}}}{\partial x} + \frac{3x\alpha_{\text{пр.упл}}}{H_{0\text{упл}}\sqrt{r_{\text{в.п}}^2 - x^2}} = \frac{12P_{\text{сдв}}\omega}{H_{0\text{упл}}^3} \left(\frac{h_{\text{упл.сл}}}{2} \frac{x}{\sqrt{r_{\text{в.п}}^2 - x^2}} - x \right). \quad (11)$$

Решим дифференциальное уравнение (11) методом вариации произвольной постоянной

$$\alpha_{\text{пр.упл}}(x) = \frac{d\bar{P}_{\text{упл}}}{dx} = \frac{6P_{\text{сдв}}\omega}{H_{0\text{упл}}^3} [a^2 - x^2]. \quad (12)$$

Рассмотрим соотношение

$$r_{\text{в.п}} - \sqrt{r_{\text{в.п}}^2 - x^2} = r_{\text{в.п}} - r_{\text{в.п}} \left(1 - \frac{x^2}{r_{\text{в.п}}^2} \right)^{1/2}. \quad (13)$$

Считая величину $\frac{x}{r_{\text{в.п}}} \ll 1$, соотношение (13) принимает вид

$$r_{\text{в.п}} - \sqrt{r_{\text{в.п}}^2 - x^2} \approx r_{\text{в.п}} - r_{\text{в.п}} + \frac{r_{\text{в.п}}}{2} \frac{x^2}{r_{\text{в.п}}^2} = \frac{x^2}{2r_{\text{в.п}}}. \quad (14)$$

Согласно (7) находим

$$\begin{aligned} H_{0\text{упл}}^{-3} &= (h_{\text{упл.сл}} + r_{\text{в.п}} - \sqrt{r_{\text{в.п}}^2 - x^2})^{-3} \approx \left(h_{\text{упл.сл}} + \frac{x^2}{2r_{\text{в.п}}} \right)^{-3} = \\ &= h_{\text{упл.сл}}^{-3} \left(1 + \frac{r_{\text{в.п}}}{2h_{\text{упл.сл}}} \frac{x^2}{r_{\text{в.п}}^2} \right)^{-3} \approx h_{\text{упл.сл}}^{-3} \left(1 - \frac{3}{2} \frac{r_{\text{в.п}}}{h_{\text{упл.сл}}} \frac{x^2}{r_{\text{в.п}}^2} \right). \end{aligned}$$

Тогда в рассматриваемом приближении

$$\begin{aligned} \frac{a^2 - x^2}{H_{0\text{упл}}^3} &= (a^2 - x^2) H_{0\text{упл}}^{-3} \approx (a^2 - x^2) \times h_{\text{упл.сл}}^{-3} \left(1 - \frac{3}{2} \frac{r_{\text{в.п}}}{h_{\text{упл.сл}}} \times \frac{x^2}{r_{\text{в.п}}^2} \right) = \\ &= h_{\text{упл.сл}}^{-3} \left(a^2 - x^2 - \frac{3}{2} a^2 \frac{r_{\text{в.п}}}{h_{\text{упл.сл}}} \frac{x^2}{r_{\text{в.п}}^2} + \frac{3}{2} \frac{r_{\text{в.п}}}{h_{\text{упл.сл}}} \frac{x^4}{r_{\text{в.п}}^2} \right). \end{aligned}$$

Интегрируем соотношение (12) в определенных пределах:

$$\int_0^{\bar{P}_{\text{упл}}} d\bar{P}_{\text{упл.сл}} = \frac{6P_{\text{сдв}}\omega}{h_{\text{упл.сл}}^3} \int_{-a}^x \left(a^2 - x^2 - \frac{3}{2} \frac{a^2}{h_{\text{упл.сл}}} \frac{x^2}{r_{\text{в.п}}} + \frac{3}{2} \frac{x^4}{h_{\text{упл.сл}} r_{\text{в.п}}} \right) dx.$$

Вычисление интегралов приводит к следующему результату:

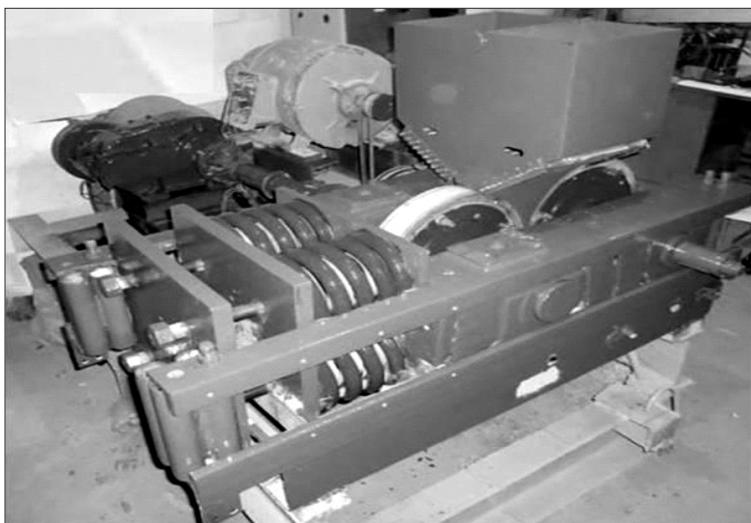
$$\bar{P}_{\text{упл. max}} = \frac{4P_{\text{сдв}}\omega a^3}{h_{\text{упл.сл}}^3} \left(\frac{3a^2}{10h_{\text{упл.сл}} r_{\text{в.п}}} - 1 \right). \quad (15)$$

Полученное уравнение позволяет рассчитать подшипниковые опоры валка предуплотнителя и демпфирующие устройства, а также мощность привода, необходимую на преодоление сил сопротивления уплотнению анизотропных материалов, подаваемых в межвалковое пространство ПВИ.

По установленному значению максимального усилия предуплотнения $P_{\text{упл. max}}$ были рассчитаны подшипниковые опоры валка предуплотнителя и демпфирующие устройства опытно-промышленной установки пресс-валкового измельчителя (рис. 2).

Разработанная конструкция опытно-промышленной модели пресс-валкового измельчителя содержит валки, над которыми в верхней части расположен загрузочный бункер с устройством для равномерной и направленной подачи анизотропных материалов.

а)



б)



Рис. 2. Опытно-промышленная установка пресс-валкового измельчителя с устройством для равномерной и направленной подачи материалов

Опытно-промышленная установка пресс-валкового измельчителя имеет следующие технические характеристики:

Габаритные размеры валков, м	
Средний диаметр, D_{cp}	0,4
Ширина, B	0,2
Частота вращения валков, s^{-1}	0,2...0,9
Величина зазора между валками, м	$(3...15) \cdot 10^3$
Максимальное противодавление, создаваемое демпферным узлом, Н / м ²	$1,5 \cdot 10^8$
Установочная мощность приводов, Вт	$26 \cdot 10^3$

Устройство для равномерной и направленной подачи анизотропных материалов (см. рис. 1, 2) содержит подвижные щеки 5, соприкасающиеся с валиками 3, 4, расположенными над валками 1, 2.

Разработанная нами конструкция пресс-валкового измельчителя с устройством для направленной подачи анизотропных материалов позволяет обеспечивать распределение по ширине, направленное движение материала в межвалковое пространство, тем самым создавая условия для силового воздействия валков в направлении наименьшей прочности кусков материала. Применение агрегата такой конструкции в технологии измельчения анизотропных материалов позволяет снизить удельные энергозатраты на 25–40 %.

Таким образом, проведенные теоретические исследования позволили установить аналитическое выражение для расчета усилия предуплотнения шихты со стороны уплотняющих валков.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романович, А.А. Особенности процесса постадийного измельчения материалов с использованием пресс-валкового агрегата [Текст] / А.А. Романович // Изв. вузов. Строительство. — 2007. — № 9. — С. 88–91.
2. Дерисевич, Г.А. Механика зернистой среды [Текст] / Г.А. Дерисевич // Проблемы механики. — Л., 1961. — Вып. 3. — С. 91.
3. Ландау, Е.М. Механика сплошных сред [Текст] / Е.М. Ландау, Э.Л. Лившиц. — М.: Гостехиздат, 1954. — 795 с.

РОМАНОВИЧ Алексей Алексеевич, канд. техн. наук; E-mail: AlexejRom@yandex.ru
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено 08.06.12

Romanovich Alexey Alexeevich, candidate of technical sciences; E-mail: AlexejRom@yandex.ru, Belgorod Shukhov State Technology University, Russia

DEVICE FOR FEEDING OF ANISOTROPIC MATERIALS IN THE PRESS-SURE ROLLS

On the basis of the classical position of the mechanics of granular media is investigated preliminary seal of charge and we obtain an analytic expression for calculation of the efforts of its pressing from the sealing rollers.

Key words: the efforts of pressing, energy-saving equipment, anisotropic materials, press-sure rolls.

REFERENCES

1. Romanovich, A.A. Features of process stepwise grinding of materials using a press roll unit [Text] / A.A. Romanovich // News of Higher Educational Institutions. Construction, 2007. — N 9. — P. 88–91.
2. Derisevich, G.A. The mechanics of granular environment [Text] / G.A. Derisevich // Problems of mechanics. — L., 1961. — Vol. 3. — 91 p.
3. Landau, E.M. Mechanics of continuous media [Text] / E.M. Landau, E.L. Levshic. — M. : Gostehizdat, 1954. — 795 p.

В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ

УДК 624.154

П.А. КРАВЧЕНКО, В.Н. ПАРАМОНОВ

ЭФФЕКТ УВЕЛИЧЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАЙ УСИЛЕНИЯ ПОД НАГРУЗКОЙ

Приведены результаты исследования увеличения несущей способности свай в условиях сохранения давления по подошве фундамента, усиленного сваями. Результаты исследования несущей способности свайно-плитного фундамента сопоставлены с результатами наблюдений за фундаментом, усиленным сваями. Получены основные зависимости, выполнен анализ полученных результатов. Кроме того, установлены зависимости распределения нагрузок в различных типах конструкций (свайные и усиливаемые фундаменты).

Ключевые слова: усиление фундаментов, сваи усиления, распределение нагрузок при усилении, несущая способность сваи.

Строительство зданий на свайных фундаментах в Санкт-Петербурге достаточно широко распространено, что связано с наличием в инженерно-геологическом разрезе достаточно мощной толщи слабых глинистых грунтов, составляющей десятки метров. При проектировании такого рода свай пренебрежение долей нагрузки, передаваемой черезrostверк, не дает существенной погрешности в оценке несущей способности фундамента в целом.

Однако на сегодняшний день в Санкт-Петербурге сохранилось большое количество исторических зданий. При обследовании зданий зачастую оказывается, что нагрузка по подошве фундамента превышает допустимые значения (расчетное сопротивление, несущая способность), регламентированные современными нормами. Кроме того, нередко с подобной проблемой сталкиваются при реконструкции исторических зданий (нагрузка от конструкций на фундаменты увеличивается), что требует усиления основания и фундаментов здания, в том числе пересадкой на сваи.

В нормативной литературе отсутствуют указания, на какую нагрузку должны быть рассчитаны сваи усиления и какова их несущая способность в составе усиливаемого фундамента. Поэтому проектировщик, как правило, несущую способность определяет расчетом по формулам нормативной литературы или испытаниями свай за пределами усиливаемого фундамента. Нагрузка же, передаваемая на сваи, часто принимается равной полной нагрузке от здания, т.е. считается, что передача нагрузки через усиливаемый фундамент полностью исключается.

Для изучения эффектов, происходящих при усилении фундаментов сваями, нами проведены исследования в лотках, результаты которых приведены в настоящей статье.

В лаборатории кафедры «Основания и фундаменты» ПГУПС с целью изучения особенности распределения нагрузок между существующими фундаментами и сваями усиления в процессе увеличения нагрузок на

фундаменты выполнены несколько серий лотковых экспериментов. Грунты основания моделировались песками пылеватыми (гранулометрический состав песков представлен в таблице). Диаметр лотка составлял

Гранулометрический состав грунтов основания

Вес пробы, г	Вес фракций	>10 мм	10–5 мм	5–2 мм	2–1 мм	1–0,5 мм	0,5–0,25 мм	0,25–0,1 мм	< 0,1
	г	—	1,46	1,47	1,95	9,25	20,93	78,86	129,46
	%	—	0,6	0,6	0,8	3,8	8,6	32,4	53,2

710 мм, толщина слоя грунта — 1300 мм. Перед началом каждого эксперимента грунт извлекался из лотка и укладывался обратно с послойным уплотнением. Перед началом эксперимента режущим кольцом отбиралась проба грунта, определялась его влажность и плотность. Эксперименты выполнялись при влажности грунтов в диапазоне от 7,55 до 8,16 % и плотности от 1,28 до 1,32 г/см³ (пески в рыхлом состоянии).

Критерием необходимости устройства свай усиления служила нагрузка на штамп, при которой давление по подошве штампа достигает значения расчетного сопротивления. Эта нагрузка определялась по результатам предварительной серии экспериментов (штамповочных испытаний) для квадратного штампа размерами в плане 150×150 мм, соответствующего по размерам модели усиливаемого фундамента 1,5×1,5 м. Результаты испытания штампа приведены на рис. 1.

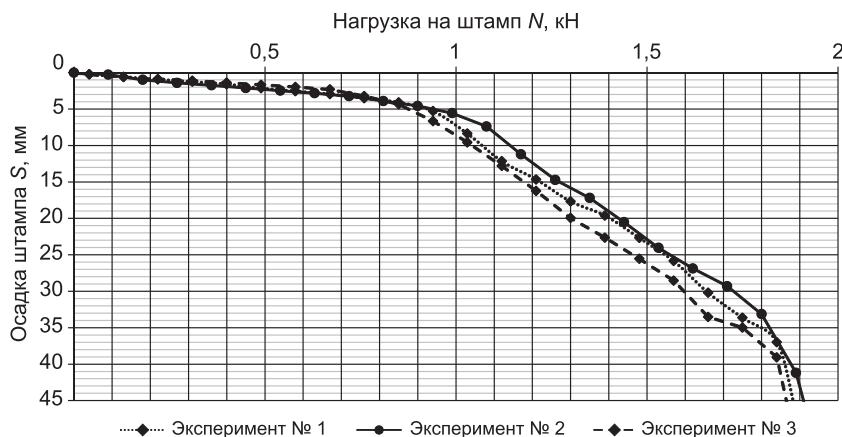


Рис. 1. Графики зависимости осадки штампа от нагрузки для трех экспериментов

Из графика видно, что давление по подошве штампа, соответствующее значению расчетного сопротивления грунта, достигается при нагрузке на штамп около 800 Н. При этом результаты экспериментов показали довольно высокую степень корреляции с расчетными значениями (расхождение по величине расчетного сопротивления не превысило 19,1 %, по несущей способности не превышает 2,7 %).

Модель свай усиления представляла собой металлическую трубу наружным диаметром 16 мм, длиной 300 мм. Проведены испытания моделей одиночных свай с пошаговым нагружением. Ступень нагрузки принята 3 Н. Срыв свай происходил в интервале нагрузок от 81 до 84 Н, т.е. осредненная несущая способность одиночной сваи длиной 0,3 м в условиях лоткового эксперимента составляет $F_d = 84$ Н. При этом расхождение результатов экспериментов не превышает 3,6 %.

Для моделирования усиления использовался тот же лоток с аналогичными грунтовыми условиями. Штамп загружался ступенями (каждая ступень нагружения составляла 9 Н по аналогии с экспериментами предварительной серии), фиксировались осадки штампа.

По достижению нагрузкой на штамп значения 810 Н через отверстия в штампе задавливались сваи усиления диаметром 16 мм и длиной 300 мм. Шаг установки свай составлял три диаметра, схема 2×2 . В процессе установки свай во всех опытах отмечалась технологическая осадка штампа, после чего продолжалось пошаговое загружение усиленного штампа. Нагрузка увеличивалась до достижения суммарной осадки модели, равной $3/4$ осадки неусиленного штампа. Потери несущей способности модели фундамента достичь не удалось.

Эксперименты выполнялись трехкратно, максимальное расхождение значений осадок по графикам зависимости осадки от нагрузки составило 12,1 %, что говорит о хорошей повторяемости экспериментов. Осредненные значения зависимости осадки от нагрузки для штампа сопоставлены с осредненными значениями для модели усиленного фундамента и представлены на рис. 2.

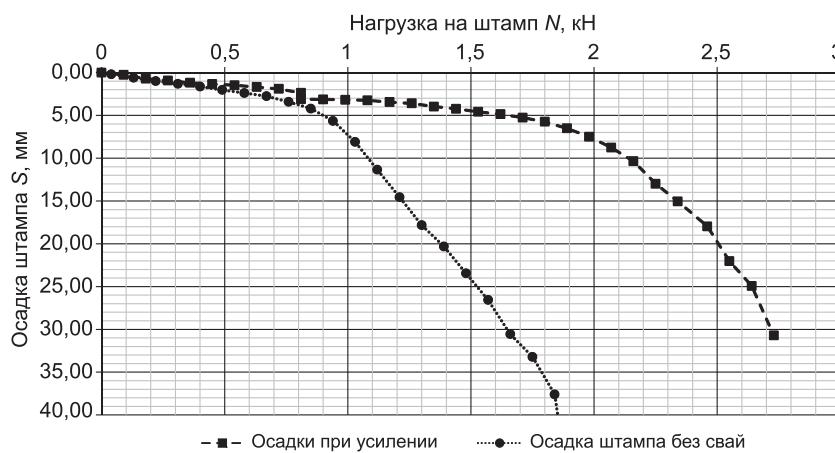


Рис. 2. Сопоставление осадок усиленного и неусиленного штампа

Из графика видно, что усиление фундамента шириной 150 мм сваями длиной 300 мм приводит к существенному снижению осадки на интервале от нагрузки, соответствующей расчетному сопротивлению, до нагрузки, соответствующей несущей способности основания неусиленного штампа. На последующих ступенях загружения наблюдается увеличение приращения осадок модели фундамента, подобное увеличению приращения осадок штампа при превышении давления по подошве величины расчетного сопротивления штампа.

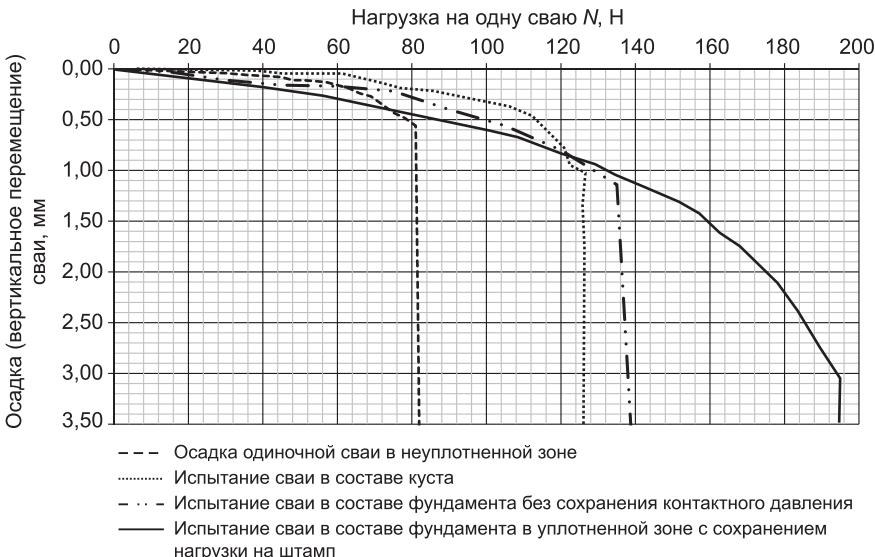
Сравнивая графики испытаний усиленного и неусиленного штампов, заметим, что несущая способность штампов увеличилась примерно на 900 Н. Суммарная же несущая способность четырех свай усиления составляет $84 \times 4 = 336$ Н. Таким образом, несущая способность усиленного фундамента увеличивается на величину, большую, чем несущая способность свай усиления. В результате была выдвинута гипотеза о появлении сверхсуммарного эффекта, проявляющегося в увеличении несущей способности свай в усиленном фундаменте по сравнению с несущей способностью одиночной сваи. Подобный эффект описан и в [1] для зданий

на свайных фундаментах. Для проверки этой гипотезы проведена серия дополнительных экспериментов по испытанию свай в лотке.

Для исследования эффекта увеличения несущей способности свай в составе усиленного фундамента было проведено несколько серий дополнительных испытаний свай в различных условиях (все эксперименты проводились с трехкратной повторяемостью):

- свая в составе свайного фундамента в неуплотненной зоне;
- свая в составе фундамента в уплотненной зоне без сохранения нагрузки на модель фундамента;
- свая в составе фундамента в уплотненной зоне с сохранением нагрузки на модель фундамента.

Результаты экспериментов приведены на рис. 3.



Rис. 3. График сопоставления результатов испытания свай

Для определения несущей способности свай в кусте (с учетом влияния соседних свай) были выполнены испытания свайного фундамента с высоким ростверком. Эксперименты показали хорошую повторяемость, максимальное расхождение несущей способности свай в составе свайного фундамента с высоким ростверком составило 4,7 %.

По результатам эксперимента можно сделать вывод о том, что несущая способность свай в составе фундамента с высоким ростверком составляет приблизительно 126 Н при пересчете на одну сваю, что свидетельствует о повышении несущей способности свай в составе фундамента (с шагом свай $3d$) на 41,5 Н (или на 51 %).

В ходе эксперимента по моделированию свайно-плитного фундамента (свайного фундамента с низким ростверком) после достижения осадкой фундамента $3/4$ предельной осадки неусиленного штампа был полностью разгружен. Затем проводились статические испытания свай в составе фундамента. Для этого две диагонально расположенные сваи были выключены из работы и загружены до срыва. Нагрузка прикладывалась пошагово, ступень нагружения составила 3 кг. Максимальное расхождение результатов трех экспериментов — 12 %. В составе свайно-плитного фундамента в условиях лоткового эксперимента несущая способность свай составляет 135 Н, что на 12,5 Н (10 %) больше, чем у

свайного фундамента с высоким ростверком, и на 61 % больше, чем у одиночной сваи.

На заключительном этапе испытаний свай проведена серия экспериментов по моделированию усиления фундаментов при нагрузках, соответствующих расчетному сопротивлению фундамента. При достижении осадки модели усиливаемого фундамента, равной $3/4$ предельной осадки неусиленного штампа, было определено значение давления по подошве штампа (за вычетом нагрузки, передаваемой сваями на основание). Модель разгружалась до вычисленной нагрузки (по подошве фундамента) и сваи отсоединялись от фундамента. Таким образом, нагрузка под плитой оставалась неизменной. Далее пошагово загружалась одна-две сваи до провальной осадки. Расхождение результатов статических испытаний свай в трех экспериментах не превысило 2,6 %. При этом срыв сваи фиксировался при нагрузках в диапазоне от 199,8 до 205,2 Н на сваю.

Описанные в статье серии лотковых экспериментов показали, что усиление фундаментов короткими сваями приводит к ощутимому увеличению несущей способности фундаментов, позволяя при этом существенно снизить интенсивность приращения осадок при повышении нагрузки на фундамент. Также было отмечено, что давление, действующее по подошве фундамента, вызывает увеличение несущей способности сваи до 2,3 раз по сравнению с несущей способностью одиночной сваи и до 1,44 раза по сравнению с несущей способностью свай, испытанных в составе куста, что свидетельствует об эффективности усиления фундаментов сваями. Несущая способность таких фундаментов, определенная в соответствии с требованиями нормативной документации [2, 3], оказывается ниже несущей способности фундамента, неусиленного сваями; несущая способность свай, вычисленная по формулам и таблицам норм, в несколько раз ниже несущей способности сваи в составе фундамента усиления. Данное противоречие полученным в результате эксперимента данным свидетельствует о возможности совершенствования инженерных расчетных методик современной нормативной документации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Some observations on pile footings [Текст] / Serge Borel, Olivier Combarieu. — Budapest: 2nd Int. PhD Symposium in Civil Engineering, 1998.
2. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01–83*. — М. : Министерство регионального развития Российской Федерации, 2011.
3. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03–85. — М. : Министерство регионального развития Российской Федерации, 2011.

КРАВЧЕНКО Павел Александрович, асп.

Петербургский государственный университет путей сообщения

ПАРАМОНОВ Владимир Николаевич, д-р техн. наук, проф.

Петербургский государственный университет путей сообщения

Получено после доработки 05.06.12

Kravchenko Pavel Alexandrovich, post-graduate student, Petersburg State Transport University, Russia

Paramonov Vladimir Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, Petersburg State Transport University, Russia

BEARING CAPACITY INCREASING EFFECT IN PILE-STRENGTHEN FOUNDATIONS UNDER LOADING

The article describes results of research of pile bearing capacity increasing in condition of saving under-raft pressure in pile-strengthen foundation. Results of research of bearing capacity of pile raft foundation are compared with results, received with observation of pile-strengthen foundations. The basic laws are deduced, analysis of the received results is made. Beside, dependences of distribution of loadings in various types of designs (the pile and strengthened bases) are established.

Key words: pilestrengthen foundations, strengthening piles, load displacement pile-strengthen foundations, pile bearing capacity.

REFERENCES

1. Some observations on pile footings [Text] / Serge Borel, Olivier Combarieu. — Budapest : 2nd Int. PhD Symposium in Civil Engineering, 1998.
 2. SP 22.13330.2011. Soil bases of buildings and structures. The staticized edition of SNiP 2.02.01-83*. — M. : Regional Development Ministry of Russian Federation, 2011.
 3. SP 24.13330.2011. Pile foundations. The staticized edition of SNiP 2.02.03-85. — M. : Regional Development Ministry of Russian Federation, 2011.
-

ВНЕДРЕНИЕ НАУЧНЫХ ДОСТИЖЕНИЙ В ПРОИЗВОДСТВО

УДК 697.2:621.577

М.Ю. ТОЛСТОЙ, Н.В. ВИЛОР, Н.А. ЯРИНА, Е.Э. БАЙМАЧЕВ

РАЗВИТИЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК — СТАНЦИЙ

Рассматривается проблема использования первичного тепла из альтернативных низкокопотенциальных природных и антропогенных источников. Дан анализ эффективности применяемых теплонасосных установок — станций в сопоставлении с традиционными теплоисточниками.

Ключевые слова: тепловые насосы, альтернативные источники тепла, температура грунтов и вод, теплоснабжение, экономическая эффективность, экологически чистая энергия.

Повышение стандартов чистоты атмосферы населенных пунктов и повышения качества окружающей среды на охраняемых природных территориях с рекреационно-лечебными объектами, а также внедрение энергосберегающих и энергоэффективных технологий ориентируют техническое развитие энергетики региона на привлечение альтернативных экологически чистых источников энергии. Цель данной работы заключается в рассмотрении экономической эффективности наиболее экологичных теплонасосных теплогенерирующих установок, использующих природные источники первичного тепла, хотя еще и немногочисленных, в сопоставлении с существующими угольными котельными и ТЭЦ.

Развитие альтернативной энергетики уже более десятилетия считается в России перспективным направлением. Тем не менее на фоне положительных намерений и благопожеланий примеров экономически удачного применения альтернативных источников немного. Важнейшими причинами замедленного развития этой отраслевой ветви являются, с одной стороны, отсутствие инвестиций в приобретение и освоение новой техники: тепловых насосов, солнечных и ветровых генераторов, с другой — в целом обеспеченность страны традиционными энергоисточниками. Наращиваются запасы и добыча всех видов ископаемых энергетических углеводородов, готовятся к вводу огромные мощности гидроэнергетики, пока еще имеются запасы древесины и ее отходов для топлива. Но вместе с тем из-за местной неразвитости транспортной и энерготранспортной инфраструктуры, несовершенства и неурядиц тарифной политики в некоторых районах и предприятиях независимо от региона России сохраняется или нарастает энергодефицит. При таких обстоятельствах использование альтернативных источников энергии становится актуальным.

© Толстой М.Ю., Вилор Н.В., Ярина Н.А., Баймачев Е.Э., 2012

В Иркутской области имеется опыт получения первичной альтернативной тепловой энергии из наиболее доступных источников (табл. 1) с помощью теплонасосных установок — станций (ТНУ).

Источники первичной тепловой энергии, используемые при организации теплоснабжения с применением ТНУ

Вид первичного источника тепла	Состав	Температура, °C
Воды	Поверхностные	3 ÷ 8
	Подземные, в том числе минеральные	6 ÷ 50
	Сточные	15 ÷ 18
Грунты	Различного состава на глубине ниже уровня сезонного промерзания	5 ÷ 11

Поверхностные воды региона включают тепловые ресурсы текущих не-перемерзающих вод мощных рек, например, Ангары, и глубин оз. Байкал. Подземные воды дают тепловой потенциал из скважин, добывающих глубинную минеральную воду с температурой выше 10 °C, и неисчерпаемых запасов первичного тепла природных горячеводных месторождений на бальнеологических курортах. ТНУ на сточных водах сооружаются около муниципальных станций очистки с использованием тепла промышленных и коммунально-бытовых стоков. Первичное тепло извлекается теплообменниками из скважин глубиной около 25–45 м для теплоснабжения муниципальных жилых домов.

Климатический фактор оказывает главное влияние на колебания температуры грунтов при их использовании в качестве источников первичного тепла, особенно для верхней, сезонно промерзающей части, в так называемом деятельном слое. Суточные температурные колебания в грунтах зависят от термических условий поверхности, значительно сокращаясь на глубине 60–80 см [1]. Годовые амплитуды температур достигают 40–50 °C и уменьшаются на глубине 2,5–3 м в подошве сезонно промерзающего слоя. Они составляют 2–2,2 °C на пяти метрах ниже поверхности, затухая на глубине 12–16 м. В среднем у грунтов ниже уровня сезонного промерзания характерны температуры около 2,6–4,2 °C. Дальнейшее повышение температуры в более глубоких частях грунтовой толщи и в подстилающих горных породах находится под влиянием геотермического градиента и определяется тепловыми свойствами локального геологического разреза [2]. Увеличение нагрева горных пород под влиянием глубинного теплового потока до глубин 800 м, доступных практическому освоению, отражается линейным корреляционным уравнением

$$t = (0,156 \pm 0,022) \cdot h + (4,7595 \pm 3,0048), \quad (1)$$

где t — температура горных пород, °C; h — глубина, м. Средняя температура пород на глубине 800 м составляет около $17,63 \pm 4,13$ °C при геотермическом градиенте $1,19 \div 1,69$ °C / 100 м. На больших глубинах градиент увеличивается до $2 \div 2,5$ °C / 100 м в соответствии с региональным глубинным теплопотоком около 50 мВт / м² [2].

В Иркутской городской агломерации сооружены и действуют три ТНУ, использующие перечисленные первичные источники.

1. ТНУ теплоснабжения Байкальского музея и 3-этажного лабораторного корпуса института ЛИН СО РАН в пос. Листвянка на берегу

оз. Байкал, использующая первичное тепло глубинных вод озера с постоянной положительной температурой.

2. ТНУ теплоснабжения Байкальской станции очистки сточных вод Байкальского ЦБК и г. Байкальска, в которой применяется тепло очищенных стоков с температурой 17–18 °С.

3. ТНУ теплоснабжения экспериментального энергосберегающего жилого 26-квартирного дома в 251-м квартале г. Ангарска, получающая первичное тепло от теплообменников, размещенных в грунтовых скважинах на глубине до 45 м.

Кроме того, предполагается сооружение ТНУ на станции очистки промышленных и коммунально-бытовых стоков в г. Иркутске.

При сооружении ТНУ в Байкальском музее ЛИН СО РАН использована наиболее простая схема компоновки основных узлов двух взаимно дополняющих блоков — теплонасосов НТ–60 и НТ–70, изготовленных по проекту «ООО Специальное конструкторское бюро Института передовых исследований» при Институте теплофизики СО РАН (Новосибирск) на Читинском заводе специального машиностроения в 2002–2004 гг. Во внутреннем контуре «испаритель — конденсатор» находится хладоагент R 134 A. При постоянно действующем НТ–70 пиковый догрев во время морозов производится индукционным электробойлером. Значительное понижение температуры воды теплосети здания включает в работу дополнительный теплонасосный блок НТ–60. На всех арматурных ответвлениях ТНУ установлены 16 контролирующих термодатчиков.

В 2010 г. проект ТНУ в г. Байкальске по использованию низкопотенциальной теплоты очищенных стоков канализационных сооружений МУП «КОС Байкальского муниципального образования» реализован компанией ОАО «Иркутскэнерго» при финансовом партнерстве с ОАО «Газпромбанк». Поставка и наладка оборудования выполнены финской компанией «ScanCool». Тепло очищенных стоков с температурой 17–18 °С от пластинчатого теплообменника гликолем передается в тепловой насос НР 292 I, где во внутреннем контуре в качестве рабочего тела применяется хладоагент — HFC (гидрофлюорокарбон). В распределительном контуре нагревается обратная вода из системы теплоснабжения зданий КОС. Тепловая мощность ТНУ составляет 1,65 МВт.

В феврале — марте 2012 г. в 251-м квартале г. Ангарска сдан под заселение из ветхого жилья экспериментальный энергосберегающий дом, при сооружении которого использованы энергосберегающие технологии. Дом создан на средства Федерального фонда содействия реформированию ЖКХ и регионального бюджета. Тепловое оборудование, поставленное компанией «Veissmann», включает рекуперативные вентиляционные установки Vitovent 300 и тепловой насос Vitocal 300-G мощностью 42 кВт. Тепловой насос использует низкопотенциальную энергию грунта с температурой от +5 до +8 °С, извлекаемую 16-скважинными теплообменниками (+ 14 в резерве). Рабочим веществом во внутреннем контуре является хладоагент R 410 A. Температура воды в отопительной системе 26-квартирного дома на 70 жителей достигает 60 °С. Пиковый догрев производится подогревателем, соединенным с центральной городской тепловой сетью. При положительных экономических результатах эксплуатации данного объекта аналогичные энергосберегающие технологии предполагается применить при сооружении жилых домов в других районах области и учебно-административного здания в г. Иркутске.

В аспекте экономической эффективности ценообразование на тепловую продукцию, производимую ТНУ, является решающим обстоятельством развития этой отрасли теплоснабжения. Существенная функция це-

ны тепловой энергии, получаемой данным способом, — стимулировать замену дефицитного и экологически грязного углеводородного топливного сырья, особенно в Центральной экологической зоне охраняемой Байкальской природной территории, имеющей статус Всемирного наследия, на альтернативную, экологически чистую энергию, в том числе геотермальную, благодаря величине ниже установленных тарифов на традиционную теплоту. Определение и сравнение экономической эффективности имеющихся ТНУ проведено на основе таких показателей работы тепловых насосов, как коэффициент преобразования энергии

$$КОП = t_{\text{вых}} / (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}),$$

где $t_{\text{вых}}$ — температура на выходе из ТНУ,
 $t_{\text{вх}}$ — температура первичного теплоисточника;
коэффициент первичной энергии (холодильный коэффициент, СОР)

$$КПЭ = M_{\text{пр}} / M_{\text{потр}},$$

где $M_{\text{пр}}$ — производимая тепловая мощность,
 $M_{\text{потр}}$ — потребляемая мощность [3];
стоимость произведенной тепловой энергии

$$\Pi = (T \cdot M_{\text{потр}}) / M_{\text{пр}},$$

где T — тариф на электроэнергию (0,69 руб./кВт·ч — для физических лиц в городских поселениях Иркутской области).

В полученное сопоставление технико-экономических параметров рассмотренных ТНУ (табл. 2) включены предварительно рассчитанные

Таблица 2

Параметры геотермальных теплонасосных станций теплоснабжения, функционирующих и предполагаемой, в некоторых населенных пунктах юга Иркутской области

Параметры, коэффициенты	Место расположения ТНУ			
	Листвянка	Байкальск	Ангарск	Иркутск (оценка)
Коэффициент преобразования энергии, КОП	1,1	1,45	1,12	1,43
Коэффициент первичной энергии, КПЭ	2,67	5–5,5	4,5	3,3
Стоимость полученной тепловой энергии, руб./кВт·ч	0,26	0,14	0,15	0,21
Стоимость ТНУ, тыс. руб.	2,16	40 000	1040	≥28 000
Потребляемая мощность, кВт	30	335	9,333	32475
Температура на входе, °C	4–8	17	6,5	18
Температура на выходе, °C	55	55	60	60
Производимая тепловая мощность, кВт	80	1650	42	107107

показатели потенциальных возможностей предполагаемой теплонасосной установки на станции очистки сточных вод г. Иркутска, экономическая целесообразность сооружения которой обсуждается и является предметом дискуссий. Произведенное тепло распределяется в КОС и расположенные поблизости крупные предприятия, жилой и административный кварталы. Объем сточных вод, проходящих через данные очистные сооружения, составляет 170 тыс. м³/сут со средней температурой 18 °C. Потенциал использования тепла при снижении температуры очищенных стоков в ТНУ до 5 °C может составить до 107 МВт.

Из сопоставления полученных стоимостей с тарифом на тепловую энергию, отпускаемую ОАО «Иркутскэнерго» потребителям Иркутской области от Ново-Иркутской ТЭЦ на 2012 г., составляющим 916,08 руб./МВт·ч, казалось бы очевидна низкая экономическая эффективность деятельности ТНУ. Но поскольку тарифы на тепловую энергию серьезно различаются в зависимости от района расположения потребителя и конкретного теплоисточника, теплоснабжение с привлечением ТНУ может оказаться экономически оправданным. Кроме того, как показал расчет технико-экономического обоснования для горячеводного бальнеокурорта Горячинск (Бурятия), при замене старой угольной котельной на ТНУ производство тепла удешевляется в 2 раза [4].

Выводы. 1. ТНУ, созданные в регионе, успешно работают на разнообразных альтернативных природных и антропогенных источниках первичного тепла без какого-либо ущерба для окружающей природной среды.

2. Их технико-экономические показатели определяются в целом уровнем конструкции и дают положительную тенденцию ценовых изменений с увеличением мощности установок.

3. Основным преимуществом ТНУ в крупном населенном пункте, располагающем высокоеффективной ТЭЦ, является независимость объекта их установки от работоспособности разветвленных централизованных теплосетей, что особенно важно при возникновении аварийной опасности сейсмокатастроф для морозного, зимнего отопительного сезона в сейсмоопасном регионе верхнего Приангарья и Южного Прибайкалья.

4. В малых и удаленных населенных пунктах с высокими тарифами тепло- и электроснабжения ТНУ вполне конкурентны с угольными котельными и относительно быстро окупаются.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Лещиков, Ф.Н. Мерзлые породы Приангарья и Прибайкалья [Текст] / Ф.Н. Лещиков. — Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1978. — С. 141.
- Лысак, С.В. Геотермические условия и термальные воды южной части Восточной Сибири [Текст] / С.В. Лысак. — М. : Наука, 1968. — С. 120.
- Рей, Д. Тепловые насосы (изд. на рус. яз.) [Текст] / Д. Рей, Д. Макмайл. — М. : Энергоиздат, 1982. — С. 220.
- Мороз, М.В. Вариант конструкции первой в Восточной Сибири геотермальной станции для теплоснабжения курорта «Горячинск» (Бурятия) [Текст] / М.В. Мороз, М.Ю. Толстой, Н.В. Вилор // Вестник ИрГТУ. — 2011. — № 9. — С. 162–168.

ТОЛСТОЙ Михаил Юрьевич, канд. техн. наук, проф.

*Институт архитектуры и строительства Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета
ВИЛОР Николай Васильевич, д-р геол.-мин. наук, проф.*

*Институт архитектуры и строительства Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета
ЯРИНА Наталья Анатольевна, асп.*

*Институт архитектуры и строительства Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета
БАЙМАЧЕВ Евгений Эдуардович, канд. техн. наук, доц.*

Институт архитектуры и строительства Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета

Получено 28.06.12

Tolstoi Michael Yurievich, candidate of technical sciences, professor, National research Irkutsk state technical university, Russia

Vilor Nikolay Vasilievich, doctor of geological and mineralogical sciences, professor, National research Irkutsk state technical university, Russia

Yarina Natalia Anatolieva, post-graduate student, National research Irkutsk state technical university, Russia

Baimachev Evgeniy Eduardovich, candidate of technical sciences, assistant professor, National research Irkutsk state technical university, Russia

DEVELOPMENT OF HEAT SUPPLY WITH UTILIZATION OF HEAT PUMP POWER PLANTS IN NEAR BAIKAL REGION

The problem of utilization of alternative low heat potential natural and anthropogenic sources of near Baikal region is considered at this article. The analysis of economic effect of heat pump plants, which get initial heat from these sources, is done for comparison with traditional coal and oil heat power plants activity.

Key words: heat pump plants, alternative heat sources, temperature of ground and water, heat supply, economic effect, ecological clean energy.

REFERENCES

1. Leshchikov, F.N. Frozen mountain rocks of near Angara and Baikal region [Text] / F.N. Leshchikov. — Novosibirsk : Science. Siber. Branch, 1978. — P. 141.
 2. Lisak, S.V. Geothermal conditions and thermal waters of southern part of Eastern Siberia [Text] / S.V. Lisak. — M. : Science, 1968. — P. 120.
 3. Reay, D. Heat pumps. Design and applications [Text] / D. Reay, D. Macmichael. — Oxford : Pergamon Press, 1979. — P. 224.
 4. Moroz, M.V. Variant of design of first geothermal plant for heat supply of Goraychinsk resort in Eastern Siberia (Buraytia) [Text] / M.V. Moroz, M.Yu. Tolstoi, N.V. Vilor // News of NR ISTU. — 2011. — N 9. — P. 162–168.
-

НАУЧНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

С.А. ВЛАДИМИРОВ

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ ЦЕНООБРАЗОВАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ИНВЕСТИЦИОННО-СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ*

Рецензируемая новая книга анализирует и обобщает передовой отечественный и зарубежный опыт ценообразования и оценки стоимости крупномасштабных инвестиционных проектов и программ, с учетом которого впервые в России в целях совершенствования планирования крупномасштабного капитального строительства на основе системы стоимостных показателей разработана современная методология управления стоимостью в строительстве объектов нефтегазовой промышленности, соответствующая инновационная методика и пакет прикладных программных комплексов по решению задач оценки стоимости строительства для различных участников и всех стадий инвестиционного процесса, которые позволяют значительно повысить объективность и точность сметных расчетов, за счет наличия в информационной системе базы знаний физических объемов работ по объектам-представителям в различных отраслях и регионах страны. Усовершенствованная авторская инновационная система включает в себя базу данных государственных и территориальных элементных сметных норм затрат в физических измерителях по видам работ и направлениям строительства, базу данных текущих цен на основные виды ресурсов, базу данных по объектам-представителям в регионально-отраслевом разрезе, программные комплексы управления базами данных и формирования сметных расчетов для конкретных типов крупномасштабных строек.

Важной отличительной особенностью и преимуществом настоящей книги является наличие в ней обширного справочного материала в виде аналитических таблиц, характеризующих особенности ценообразования и систему сметных показателей объектов-представителей в регионально-отраслевом разрезе в ценах 2010 г., который составляет примерно 80 % общего объема книги. Справочный материал может быть успешно использован для: экспресс-экспертизы стоимости строительства объектов в составе прединвестиционной и предпроектной документации на ранних стадиях проектирования в текущих и прогнозных ценах; разработки заданий на проектирование; формирования локальных, объектных и сводных смет в составе проектной документации; разработки проектов организаций строительства; формирования сметных расчетов в составе конкурсной документации; определения цен на строительную продукцию в составе инвестиционных и подрядных договоров; анализа конкурсных предложений отечественных и зарубежных подрядчиков; создания системы мониторинга (визуального контроля сметной стоимости строительст-

* Рецензия на книгу Резниченко В.С., Ленинцева Н.Н., Павлова В.В. «Определение сметной стоимости крупномасштабных строек на всех стадиях инвестиционного процесса».

ва), цен на строительную продукцию и ресурсы; определения затрат на временные здания и сооружения калькуляционным методом; расчета индивидуальных норм накладных расходов, на основе данных бухгалтерского учета подрядных организаций; калькулирования затрат на материалы, конструкции, оборудование, эксплуатацию строительной техники и транспортных средств в текущих ценах и др. Кроме того, все предлагаемые методы оценки стоимости строительства и механизмы управления стоимостью иллюстрируются примерами формирования сметных расчетов и смет по реальным объектам нефтегазового строительства ОАО «Газпром».

Безусловно, основные элементы предлагаемой системы определения объективной сметной стоимости крупномасштабных строек в целях оптимизации затрат инвесторов, застройщиков и подрядных организаций за счет применения более эффективной авторской методологии и сметных нормативов на всех стадиях инвестиционного процесса могут быть успешно применены в большинстве отраслей и регионов экономики России. Этому внушительному труду присущи глубокое теоретическое содержание, жесткая практическая направленность.

Книга состоит из четырех глав. В первой главе книги «Аналитические исследования и сопоставление передовых отечественных и зарубежных показателей сметной стоимости крупномасштабных строек» представлены анализ передового зарубежного опыта определения стоимости строительства объектов, сравнительный анализ зарубежных и отечественных удельных показателей стоимости строительства объектов-представителей, унифицированная система территориальных переходных коэффициентов для использования и сравнения стоимостных показателей по различным отраслям и регионам, основные принципы прогнозирования цен на строительную продукцию, анализ предложений зарубежных подрядчиков при строительстве объектов на территории Российской Федерации. Обоснована объективная необходимость индивидуального подхода в части подготовки и использования ценообразующей базы к каждому этапу инвестиционного процесса, корректного установления необходимых затрат на предпроектных фазах и ранних стадиях проектирования, использования всего информационного потенциала аналогичных предыдущих проектов.

Стоимость технологического оборудования выделена как базовая функция, с помощью которой при использовании различного рода переходных коэффициентов может быть получена не только полная стоимость объекта, но и уровень отдельных видов затрат, естественно, с точностью счета, отвечающей требованиям, предъявляемым к экспресс-оценке стоимости строительства с учетом структурных изменений затрат, вызванных ужесточением законодательных требований в области охраны окружающей среды и безопасности для здоровья работающих, ростом энергоэкономичности технологического оборудования, быстрым развитием компьютерной техники, повышенными требованиями к системе контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИП и А).

Отталкиваясь от сформулированных проблем, опираясь на передовой зарубежный опыт, авторы во второй главе книги «Современные методические подходы к определению стоимости строительства на разных стадиях инвестиционного процесса» показывают пути совершенствования отечественной сметной нормативной базы, а также механизмы оценки стоимости строительства в составе прединвестиционной, предпроектной, проектной и производственной документации. Также представлены экспресс-оценка стоимости строительства на основе пред-

проектной документации, принципы составления и использования укрупненных показателей стоимости строительства (УПСС), методические подходы к расчету коэффициентов, индексов, дефляторов и допустимые пределы их использования в сметных расчетах, методические подходы к формированию ресурсно-технологических моделей (РТМ) и ресурсно-ранжирный метод определения стоимости строительства в режиме реального времени, обоснование пределов допустимой точности сметных расчетов в зависимости от уровня предпроектной и проектной проработки, современные подходы к территориальному сметному ценообразованию при составлении сметной документации ресурсным методом на крупные стройки со сложными транспортными условиями доставки грузов, мониторинг и прогнозирование объемов капиталложений, включая инфляционные процессы в строительстве.

Содержание предлагаемой авторами инновационной системы ценообразования и управления стоимостью в строительстве *раскрыто в третьей главе книги «Совершенствование методологии формирования сводного сметного расчета (ССР) стоимости крупномасштабных строек с учетом повышения достоверности стоимостных показателей на всех стадиях инвестиционного процесса»*. С позиций системного подхода определены цели, задачи и функции различных участников инвестиционного процесса по управлению стоимостью в строительстве, принципиальные алгоритмы решения прикладных задач на различных стадиях инвестиционного процесса. В отличие от существующих методик сметных расчетов предлагаемая авторами инновационная система позволяет определить с достаточной точностью стоимость строительства на различных стадиях разработки инвестиционного проекта при любой доступной пользователю полноте исходных данных по объекту. В главе отражены системно обоснованные требования к разработке сводного сметного расчета стоимости строительства, особенности определения стоимости подготовительных работ по первой главе ССР, совершенствование методов определения затрат на временные здания и сооружения по восьмой главе ССР, уточнение состава прочих работ и затрат по девятой главе ССР с учетом специфики линейных объектов, состав и порядок выделения структурных показателей, необходимых для выполнения отдельных расчетов в составе ССР.

Принципиальное отличие предложенных авторами методов от существующих заключается в более углубленном рассмотрении всех элементов затрат, что определяет эффективность их применения. Например, предлагаемый метод оценки стоимости материальных ресурсов базируется на унифицированной классификации всех компонентов сметной цены, ее рациональном укрупнении, мониторинге рыночных цен от заводов — изготовителей ресурсов до строительной площадки. Предложения авторов по применению методов расчета стоимости, учитывающих не процентное начисление дополнительных затрат, а их дифференциированную оценку, как это предусматривают международные требования, позволили более точно рассчитывать лимитированные дополнительные затраты, составляющие значительную часть сметной стоимости строительства, подтверждены успешными результатами при заключении договоров на возведение крупномасштабных объектов ОАО «Газпром».

В четвертой главе книги «Особенности ценообразования по крупномасштабным и территориально удаленными стройкам» представлены способы формирования информационных карт (опросных листов) с отражением в них транспортных условий завоза грузов, материалов, изделий, конструкций и технологического оборудования; местных

тарифов, условий накопления и хранения МТР и оборудования, методические подходы к оптимизации калькулирования затрат на строительство и содержание временных зданий и сооружений (в том числе на устройство и содержание временных дорог и «зимников» с учетом состояния дорожного хозяйства в регионе), особые условия оплаты труда рабочих, тарифные ставки, районные коэффициенты, северные надбавки, в том числе при мобильных (вахтовых) методах выполнения работ, особенности определения стоимости эксплуатации строительной техники, правила определения затрат труда при составлении элементных сметных норм на отдельные виды строительно-монтажных работ, правила определения затрат на технологическое оборудование, практика применения методов определения отдельных видов затрат на основе различного рода процентных нормативов, особенности расчета индивидуальной нормы накладных расходов на основе данных бухгалтерского учета подрядных организаций.

Авторами обоснованы конкретные основные направления дальнейших исследований и разработок отечественной методологии и практики ценообразования и определения сметной стоимости крупномасштабных строек в особо сложных условиях строительства.

ВЛАДИМИРОВ Сергей Арсеньевич, д-р экон. наук, проф.

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Получено 04.06.12

Vladimirov Sergey Arsenyevich, doctor of economical sciences, professor,
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Russia

ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ¹

- 1.** К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:
— сопроводительное письмо руководства организации, откуда исходит рукопись;

к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи² за подпись автора или руководителя представляющей статью организации. Плата за публикацию статей аспирантов не взимается. Гарантийное письмо не требуется, если статья представляется организацией, осуществляющей целевые взносы на издание нашего журнала;

- рекомендацию соответствующей кафедры вуза (заверенную выписку из протокола заседания кафедры);
— экспертное заключение о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись;
— разрешение Роспатента на открытую публикацию материалов по заявке на изобретение.

- 2.** Рукопись должна готовиться на компьютере в программе Microsoft Word и представляться в редакцию распечатанной в двух экземплярах, с приложением ее записи на CD (3", 5").

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, имена, отчества (полностью), ученые степени, звания** (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и **английском языках**;
 - почтовые адреса, телефоны и **e-mail** авторов;
 - **название статьи на английском языке**;
 - **аннотацию на английском языке**;
 - **ключевые слова на английском языке**;
 - **библиографический список на английском языке**.

- 4.** На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

- 5.** Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением *.cdr (предпочтительно) или *.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. Иллюстрации, в том числе фотографии, должны быть черно-белыми с хорошей проработкой деталей.

Рисунки должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (внести изменения, исправления, т.е. изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки).

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, с подписями к ним. Размер иллюстрации не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

- 6.** Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

- 7.** Формулы следует набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набирать курсивом. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др.), а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *p*, *I* и *J* и т.п.) пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).

¹ С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

² На 2012 г. — из расчета 650 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

8. Следует применять физические величины, обозначения и единицы измерения в системе СИ(СИ).

9. В библиографический список включаются только те работы, которые опубликованы в печати, составленные в соответствии с ГОСТ 7.80–2000, ГОСТ 7.1–03.

Примеры оформления можно найти на Internet-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу www.sibstrin.ru и www.izvuzstr.sibstrin.ru

10. Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции. Материалы уже публиковавшихся работ к рассмотрению не принимаются.

11. Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указываются ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка «рукопись после доработки». Доработанную статью необходимо 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 2-е полугодие 2012 г.

НА НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

«СТРОИТЕЛЬСТВО»

Журнал имеет разделы

Строительные конструкции
Теория инженерных сооружений
Строительные материалы и изделия
Экономика и организация строительства
Автоматизация и технология строительного производства
Гидротехническое строительство
Санитарная техника

Строительство автомобильных дорог и мостов
Строительные и дорожные машины
Научные проблемы архитектуры и экологии
Научно-методический В лабораториях вузов
Внедрение научных достижений в производство
Научная информация

Каталожная цена за 6 месяцев — 1500 р.

Цена отдельного номера — 250 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**

№ 7–8 (643–644) 2012

Научно-теоретический журнал

Редактор *С.М. Погудина*
Технический редактор *Н.М. Макаренко*
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*
Корректор *Г.И. Шведкина*