

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ  
И НАУКИ РФ  
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ  
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 5 (641)  
Май 2012 г.

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

Главный редактор В.Г. Себешев

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

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113.  
Тел./факс 266-28-59.

[www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru) E-mail: [izvuz\\_str@sibstrin.ru](mailto:izvuz_str@sibstrin.ru)

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 30.04.12. Формат 70×108 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Усл. печ. л. 11,55+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 0041.

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕР-  
НЫХ СООРУЖЕНИЙ

**Адищев В.В., Шма-  
ков Д.С.** Определение мо-  
мента образования трещи-  
ны как нечеткой величины  
по экспериментальным дан-  
ным ..... 3

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МА-  
ТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

**Володченко А.Н., Лесо-  
вик В.С.** Автоклавные  
ячеистые бетоны на основе  
магнезиальных глин ..... 14

**Калашников В.И., Вали-  
ев Д.М.** Усадочные и проч-  
ностные свойства пропари-  
ваемых порошково-активи-  
рованных песчаных бетонов  
22

**Поляков В.С., Падо-  
хин В.А.** Пластифицирую-  
щие добавки для бетонных  
смесей на основе диспер-  
сии лигносульфонатов в  
смесях олигомеров ε-капро-  
лактама и фосфолипидов  
растительных масел ..... 29

**Юхневский П.И.** Крите-  
риальная оценка добав-  
ок-пластификаторов бе-  
тонных смесей для прогно-  
за их эффективности ..... 36

**Карпова О.В., Логани-  
на В.И., Симонов Е.Е.** Эффективность примене-  
ния известково-диатомито-  
вой декоративной штука-  
турки для отделки ограж-  
дающих конструкций ..... 44

**Туляганов А.К., Безбо-  
родов В.А.** Сухие штука-  
турные композиции на це-

ментной основе, армированные базальтовыми волокнами .....	48
<b>ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО</b>	
<b>Бальзанников М.И., Пиявский С.А., Родионов М.В.</b> Совершенствование конструкций низконапорных грунтовых переливных плотин .....	52
<b>САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА</b>	
<b>Костин В.И., Русских Е.Ю.</b> Проблемы расчета расходов холода на системы кондиционирования воздуха промышленных зданий .....	60
<b>Аверкин А.Г., Аверкин Ю.А.</b> Сушилка для рук и волос и методология ее конструктивного расчета .....	65
<b>Бройда В.А.</b> Взаимодействие парных приточно-вытяжных регенеративных устройств с естественной вытяжной вентиляцией .....	74
<b>Казаков В.Д., Пельменёва Н.Д.</b> Примерный расчет устройства для перемешивания сточных вод в головной части аэротенка-вытеснителя .....	79
<b>СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ</b>	
<b>Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Грузин А.В., Крутиков Е.И., Малышева Ю.Э., Мельникова А.С.</b> Принципиальные схемы бесклапанных пневматических ударных механизмов с воздухоподводящей трубкой и их физико-математическое описание .....	87
<b>Суворов Д.Г.</b> К вопросу проектирования уплотняющего оборудования на основе пневматических поршневых машин .....	97
<b>НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ</b>	
<b>Кукина И.В.</b> К вопросу о неплановом развитии буферных зон в структуре современного города .....	103
<b>НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ</b>	
<b>Букреев В.И., Дегтярев В.В.-мл., Чеботников А.В.</b> Эволюция волны излива в канале ограниченной длины с переменной площадью поперечного сечения .....	110
<b>Дукарт А.В., Фам Вьет Нгок, Фам Тхань Бинь.</b> О переходных режимах колебаний защищаемого объекта с гасителем, расположенного на поддерживающей конструкции, при действии на нее одиночного импульса .....	117
<b>Савельев С.В., Лашко А.Г.</b> Эмпирические исследования эффективности применения пневмошинного вальца с бандажами для уплотнения грунтов .....	127

# **ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

**УДК 624.012.45**

**В.В. АДИЩЕВ, Д.С. ШМАКОВ**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИНЫ КАК НЕЧЕТКОЙ ВЕЛИЧИНЫ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ**

Работа посвящена построению и реализации алгоритма определения изгибающего момента, соответствующего возникновению трещины в железобетонном элементе. Исходные данные для решения задачи представляются в виде нечетких величин, моды и носители которых определяются по результатам экспериментов. Расчетные функции принадлежности дают вполне приемлемые для практического применения оценки момента трещинообразования.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** неформализованные задачи, кластерный анализ, нечеткие величины, нечеткая логика, изгибаемый железобетонный элемент, момент образования трещины.

В работах [1–3] предложен и реализован подход к расчету изгибаемых железобетонных элементов с использованием энергетических соотношений. Задача о возникновении, стабилизации и росте трещины сформулирована и решена физически адекватно, но при этом все исходные данные считаются вполне определенными (детерминированными). В действительности разброс данных по характеристикам материалов и нагрузкам очень велик.

Суть предлагаемой методологии состоит в следующем. Традиционная теория сопротивления железобетона, разрабатывавшаяся большим количеством исследователей, базируется на простых соотношениях сопротивления материалов, которые оснащаются десятками поправочных «коэффициентов незнания». В принципе, это правильный выход из сложнейшего положения в условиях, когда степень унификации строительных сооружений высока и определение поправочных коэффициентов основано на испытаниях натурных образцов элементов конструкций. Но при проектировании сооружений коэффициенты запаса по прочности и трещиностойкости зачастую оказываются неоправданно завышенными. Сказывается мультиплективный эффект применения множества поправочных коэффициентов (в запас) на первоначальном этапе. В основе предлагаемой методологии лежит представление исходных данных в виде нечетких величин. Детерминистические модели предлагается рассматривать как четкие отношения между нечеткими величинами — исходными данными и требующими определения параметрами. Исходные данные определяются функциями принадлежности. Расчетные алгоритмы реализуются на языке объектно-ориентированного программирования Java. В результате для выходных параметров определяются функции принадлежности, дающие оценки типа интервальных. Таким образом, достигается

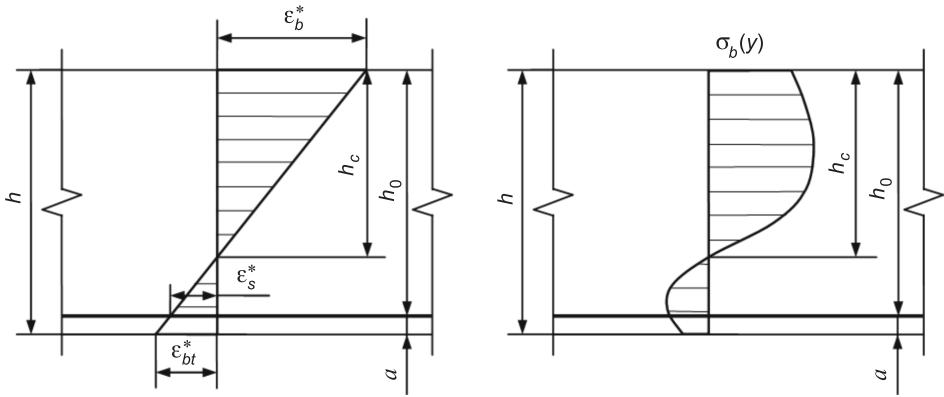


Рис. 1. Распределение деформаций и напряжений по высоте сечения при образовании трещины

цель — возможность назначения коэффициентов запаса *после проведения расчетов*.

Рассмотрим расчетное сечение железобетонной балки. Обозначения геометрических характеристик приведены на рис. 1. Ось  $OY$  направлена вниз, начало координат лежит на нейтральной оси, отделяющей сжатую и растянутую зоны.

Ширину балки  $b$  будем считать постоянной,  $h$  — высота сечения,  $h_0$  — расстояние от верхней грани до центра тяжести арматуры,  $h_c$  — высота сжатой зоны бетона,  $A_s$  — суммарная площадь поперечного сечения арматуры. В сечении действует изгибающий момент  $M$ . До образования трещины система, описывающая напряженно-деформированное состояние в сечении, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \left( -\frac{\xi}{\varepsilon_b} \right) \int_{\varepsilon_b}^{\varepsilon_{bt}} \bar{\psi}(\varepsilon) d\varepsilon + \mu_s \bar{\varphi}(\varepsilon_s) = 0; \\ \left( -\frac{\xi}{\varepsilon_b} \right)^2 \int_{\varepsilon_b}^{\varepsilon_{bt}} \bar{\psi}(\varepsilon) \varepsilon d\varepsilon + (1-\xi) \mu_s \bar{\varphi}(\varepsilon_s) = \bar{M}; \\ \varepsilon_b = \frac{\xi}{\xi-1} \varepsilon_s; \\ \varepsilon_{bt} = \frac{H-\xi}{1-\xi} \varepsilon_s, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\sigma_s = \varphi(\varepsilon)$  — функция, аппроксимирующая диаграмму арматуры;  $\sigma_b = \psi(\varepsilon)$  — функция, аппроксимирующая диаграмму бетона;  $\varepsilon_{bt}$ ,  $\varepsilon_b$ ,  $\varepsilon_s$  — деформации крайнего растянутого волокна бетона, крайнего сжатого волокна бетона и армирующего стержня.

Безразмерные величины:  $\xi = \frac{h_c}{h_0}$ ;  $H = \frac{h}{h_0}$ ;  $\mu_s = \frac{A_s}{bh_0}$ ;  $\bar{\varphi}(\varepsilon) = \frac{\varphi(\varepsilon)}{\sigma_0}$ ;  $\bar{\psi}(\varepsilon) = \frac{\psi(\varepsilon)}{\sigma_0}$ ;

$\bar{M} = \frac{M}{h_0^2 b \sigma_0}$ ;  $\bar{E}_b = \frac{E_b}{\sigma_0}$ ;  $\bar{E}_s = \frac{E_s}{\sigma_0}$ . Нормирующий множитель  $\sigma_0$  можно выбирать произвольно.

Система уравнений (1) содержит два уравнения равновесия и два кинематических соотношения.

Ограничимся рассмотрением статически определимых задач. Тогда изгибающий момент в каждом сечении можно считать заданным.

Если считать величину деформаций  $\varepsilon_{bt}^{crc}$ , при которой происходит образование трещины, заданной, то решая систему, составленную из 1, 3 и 4-го уравнений системы (1), можно найти величины  $\varepsilon_s^{crc}$ ,  $\varepsilon_b^{crc}$ ,  $\xi^{crc}$ . Затем используя найденные значения и 2-е уравнение, вычисляется значение изгибающего момента.

В соответствии с рекомендациями СП 52-101-2003<sup>1</sup> трещина в железобетонном сечении возникает, если деформация растяжения в крайнем волокне достигает предельного значения  $\varepsilon_{bt,ult}$ . Но эта величина определяется крайне расплывчато. В зависимости от продолжительности нагрузления и так называемых «условий работы» она может изменяться от  $1,5 \cdot 10^{-4}$  до  $3,6 \cdot 10^{-4}$ . Таким образом, величины  $\varepsilon_{bt}^{crc}$ ,  $\varepsilon_b^{crc}$ ,  $\varepsilon_s^{crc}$ ,  $\xi^{crc}$ ,  $\bar{M}_{crc}$  нельзя считать вполне определенными.

Как отмечалось в [1], методы расчета по двум группам предельных состояний себя исчерпали. В большинстве современных публикаций за основу принимается расчет с использованием нелинейных диаграмм деформирования материалов.

Расчет НДС в сечении и определение  $M_{crc}$  состоит в решении системы уравнений (1), если функции  $\psi(\varepsilon)$ ,  $\phi(\varepsilon)$  определены. Но если функцию  $\phi(\varepsilon)$  можно считать вполне определенной физико-механическими свойствами арматурной стали, то с функцией  $\psi(\varepsilon)$  дело обстоит значительно сложнее. Как указывалось выше, предельное значение деформаций растяжения есть величина весьма неопределенная.

Предельное сопротивление на растяжение  $R_{bt}$  считается в нормативных документах случайной величиной, распределенной по нормальному закону. Линейно-упругий участок диаграммы ограничивается условной величиной  $\varepsilon_{el}$ . Значение модуля упругости определяется формулой [СП 52-101-2003]:

$$E_b = \frac{E_{b0}}{1 + \Phi_{b,cr}},$$

где  $E_{b0}$  — начальный модуль упругости бетона,

$\Phi_{b,cr}$  — коэффициент, который в зависимости от влажности воздуха и класса бетона изменяется от 1,0 до 5,6 (рис. 2).

Очевидно, что в расчетах необходимо использовать не одну определенную кривую  $\sigma = \psi(\varepsilon)$ , а семейство кривых, или, точнее, некоторую область (см. рис. 2) на плоскости, которая соответствует нечеткой функции  $\tilde{\psi}(\varepsilon)$ :  $\psi_{\min}(\varepsilon) \leq \sigma \leq \psi_{\max}(\varepsilon)$ ,  $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{bt}^*$ .

Теперь задача сводится к решению системы (1) с нечеткой функцией  $\tilde{\psi}(\varepsilon)$  и определению нечеткой величины  $\bar{M}_{crc}$  как нечеткой границы между стадией до образования трещины и стадией после образования трещины (эксплуатационной).

Рассмотрим различные факторы, имеющие значимое влияние при построении нечеткой аппроксимации диаграммы деформирования бетона. При кратковременном нагружении и контроле за нагрузкой (контролируется скорость нагружения), кривая  $\sigma = \psi(\varepsilon)$ , как правило, не имеет ниспадающей ветви. Такое нагружение условно называется «мягким». «Жестким» называется нагружение, в процессе которого осуществляется кон-

<sup>1</sup> СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. М., 2003.

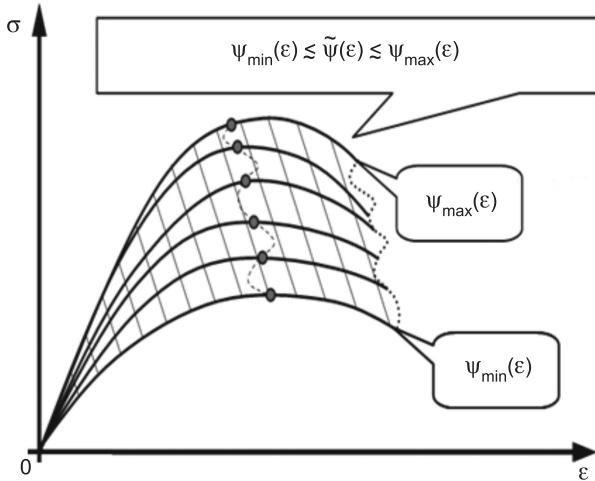


Рис. 2. Нечеткая аппроксимация диаграммы деформирования бетона

троль за деформациями (контролируется скорость деформирования). Считается, что при таком нагружении кривая  $\sigma = \psi(\varepsilon)$  имеет ниспадающую ветвь. Физический эксперимент, определяющий ниспадающую ветвь, поставить сложно, тем не менее в расчетах используются кривые с ниспадающими ветвями. Существуют различные способы трансформирования аналитических зависимостей, полученных для «мягкого» нагружения, в аналитические зависимости для «жесткого» нагружения. Наиболее адекватным, по нашему мнению, является применение энергетического соотношения [2, 3] (рис. 3):

$$W_{rt} = \int_0^{\varepsilon_{bt}^*} \psi_1(\varepsilon) d\varepsilon = \int_0^{\varepsilon_{bt}^{**}} \psi_2(\varepsilon) d\varepsilon. \quad (2)$$

Это равенство соответствует условию постоянства удельной энергии деформирования  $W_{rt}$  в состоянии предразрушения. Критический уровень удельной энергии деформирования можно считать характеристикой материала. В качестве рабочей гипотезы, можно принять предположение о независимости этого параметра от характера нагрузки.

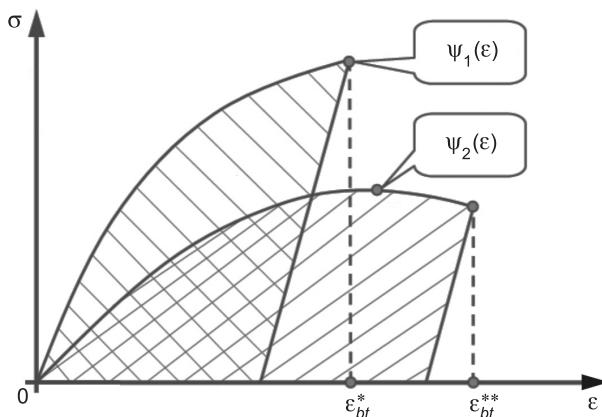


Рис. 3. Трансформация диаграмм

Наибольшей степенью неопределенности обладает величина предельной деформации на растяжение. Будем эту величину  $\varepsilon_{bt}^{crc}$  считать нечетким числом с неизвестной функцией принадлежности. Тогда для замыкания системы (1) необходимо еще одно соотношение. Используем условие постоянства удельной энергии разрушения

Используя соотношение (2) из экспериментальных кривых для «мягкого» нагружения, можно получить нечеткую аппроксимацию  $\tilde{\psi}(\varepsilon)$ .

$$\overline{W}_{rt} = \frac{W_{rt}}{\sigma_0} = \int_0^{\varepsilon_{bt}^{crc}} \overline{\psi}(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (3)$$

т.е. величину  $W_{rt}$  в дальнейшем будем считать характеристикой бетона, также обладающей некоторой степенью неопределенности.

Трещина в растянутой зоне бетона возникает при сравнительно небольших деформациях в сжатом бетоне. Поэтому будем считать, что  $\varepsilon_3 < \varepsilon_b < 0$ , т.е. деформации сжатия подчиняются закону Гука  $\bar{\sigma}_b = \bar{E}_b \varepsilon_b$ . Деформации бетона на растяжение не превышают  $3,6 \times 10^{-4}$ , в этом диапазоне сталь также подчиняется закону Гука:  $\bar{\sigma}_s = \bar{E}_s \varepsilon_s$ .

Для упрощения выкладок будем считать, что защитный слой бетона отсутствует, т.е.  $H=1$  ( $H_0=h$ ),  $\varepsilon_{bt}=\varepsilon_s$ . Тогда система уравнений (1) принимает вид:

$$\begin{cases} \varepsilon_b = -\frac{\xi}{1-\xi} \varepsilon_{bt}; \\ \left( -\frac{\xi}{\varepsilon_b} \right) \int_{\varepsilon_b}^{\varepsilon_{bt}} \overline{\psi}(\varepsilon) d\varepsilon + \mu_s \bar{E}_s \varepsilon_{bt} = 0; \\ \left( -\frac{\xi}{\varepsilon_b} \right) \int_{\varepsilon_b}^{\varepsilon_{bt}} \overline{\psi}(\varepsilon) \varepsilon d\varepsilon + (1-\xi) \mu_s \bar{E}_s \varepsilon_{bt} = \bar{M}. \end{cases} \quad (4)$$

Исходными данными являются величины  $\mu_s$ ,  $E_s$ ,  $b$ ,  $h_0$ , а также удельная энергия разрушения  $W_{rt}$  и функция, аппроксимирующая диаграмму бетона. Величины, определяющие аппроксимирующую функцию, являются нечеткими [4, 5]. При этом уравнения системы (4), включающей кинематическое соотношение и уравнения равновесия, представляют собой четкие отношения. Таким образом, нечеткие величины  $\xi$ ,  $\tilde{\varepsilon}_b$ ,  $\varepsilon_{bt}$  обязаны удовлетворять уравнению

$$\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bt}} = -\frac{\xi}{1-\xi} = \frac{\xi}{\xi-1}.$$

Для растянутой зоны рассмотрим аппроксимирующую функцию, построенную в [5]:  $\psi(\varepsilon) = A\varepsilon^2 + B\varepsilon$ .

В безразмерном виде:

$$\overline{\psi}(\varepsilon) = \bar{E}_b \varepsilon, \quad \bar{E}_b = \frac{E_b}{\sigma_0} \quad \text{для сжатой зоны};$$

$$\overline{\psi}(\varepsilon) = \bar{A} \varepsilon^2 + \bar{B} \varepsilon, \quad \bar{A} = \frac{A}{\sigma_0}, \quad \bar{B} = \frac{B}{\sigma_0} \quad \text{для растянутой зоны}.$$

Тогда из 2-го уравнения системы (5) следует:

$$-\frac{\xi}{\varepsilon_b} \int_{\varepsilon_b}^0 \bar{E}_b \varepsilon d\varepsilon - \frac{\xi}{\varepsilon_b} \int_0^{\varepsilon_{bt}} \overline{\psi}(\varepsilon) d\varepsilon + \mu_s \bar{E}_s \varepsilon_{bt} = 0$$

или

$$-\frac{\xi}{\varepsilon_b} \int_{\varepsilon_b}^0 \bar{E}_b \varepsilon d\varepsilon - \frac{\xi}{\varepsilon_b} \bar{W}_{rt} + \mu_s \bar{E}_s \varepsilon_{bt} = 0,$$

$$\text{где } \bar{W}_{rt} = \frac{W_{rt}}{\sigma_0}.$$

После интегрирования получим

$$\frac{\xi}{\varepsilon_b} \bar{E}_b \frac{\varepsilon_b^2}{2} - \frac{\xi}{\varepsilon_b} \bar{W}_{rt} + \mu_s E_s \varepsilon_{bt} = 0$$

или выражая  $\varepsilon_b$  через  $\varepsilon_{bt}$ :

$$-\bar{E}_b \frac{\xi^2}{(1-\xi)^2} \varepsilon_{bt}^2 + \bar{W}_{rt} + \frac{\mu_s \bar{E}_s \varepsilon_{bt}^2}{1-\xi} = 0. \quad (5)$$

Безразмерные величины  $\xi$  (высота сжатой зоны) и  $\eta$  (высота растянутой зоны) связаны соотношением  $\xi + \eta = 1$ . Нечеткие величины  $\tilde{\xi}$  и  $\tilde{\eta}$  также должны быть связаны тем же соотношением:  $\tilde{\xi} + \tilde{\eta} = 1$ . В расчетах с использованием нечетких величин, очевидно, удобнее вместо двух нечетких величин использовать одну. Введем параметр, равный отношению растянутой и сжатой зон:

$$\zeta = \frac{\xi}{\eta} = \frac{\xi}{1-\xi}.$$

Уравнение (5) преобразуем с учетом очевидных соотношений  $\xi = \frac{\zeta}{1+\zeta}$ ;  $\eta = 1-\xi = \frac{1}{1+\zeta}$ :

$$\zeta^2 - \zeta \mu_s \frac{\bar{E}_s}{\bar{E}_b} - \mu_s \frac{\bar{E}_s}{\bar{E}_b} - \frac{\bar{W}_{rt}}{\bar{E}_b \varepsilon_{bt}^2} = 0$$

или

$$\zeta^2 - \mu_s \alpha_s \zeta - \left( \mu_s \alpha_s + \frac{W_{rt}}{E_b \varepsilon_{bt}^2} \right) = 0, \quad (6)$$

$$\text{где } \alpha_s = \frac{E_s}{E_b} = \frac{\bar{E}_s}{\bar{E}_b}.$$

Решение уравнения (6), имеющее физический смысл:

$$\zeta = \frac{\mu_s \alpha_s}{2} + \sqrt{\frac{\mu_s^2 \alpha_s^2}{4} + \mu_s \alpha_s + \frac{W_{rt}}{E_b \varepsilon_{bt}^2}}.$$

В предположении, что нечеткие величины связаны четкими соотношениями, следующими из системы (4), получим:

$$\begin{aligned} \tilde{\zeta} &= \frac{\tilde{\mu}_s \tilde{\alpha}_s}{2} + \sqrt{\frac{\tilde{\mu}_s^2 \tilde{\alpha}_s^2}{4} + \tilde{\mu}_s \tilde{\alpha}_s + \frac{\tilde{W}_{rt}}{\tilde{E}_b \tilde{\varepsilon}_{bt}^2}} = \frac{\tilde{\mu}_s \tilde{\alpha}_s}{2} + \sqrt{\frac{\tilde{\mu}_s^2 \tilde{\alpha}_s^2}{4} + \tilde{\mu}_s \tilde{\alpha}_s + \frac{\tilde{E}_s \cdot \tilde{W}_{rt} \tilde{E}_s}{\tilde{E}_s^2 \tilde{\varepsilon}_{bt}^2}} = \\ &= \frac{\tilde{\mu}_s \tilde{\alpha}_s}{2} + \sqrt{\frac{\tilde{\mu}_s^2 \tilde{\alpha}_s^2}{4} + \tilde{\mu}_s \tilde{\alpha}_s + \tilde{\alpha}_s \frac{\tilde{W}_{rt}}{\tilde{\sigma}_s^2}}, \end{aligned}$$

$$\text{где } \tilde{\sigma}_s = \tilde{E}_s \tilde{\varepsilon}_{bt} = \tilde{E}_s \tilde{\varepsilon}_s, \quad \tilde{W}_{rtn} = \tilde{W}_{rt} \tilde{E}_s, \quad \tilde{\alpha}_s = \frac{\tilde{E}_s}{\tilde{E}_b},$$

$$\tilde{E}_s = (\underline{E}_{s,0}, E_{s,1}, \bar{E}_{s,0}) = (2 \cdot 10_0^5; 2 \cdot 10_1^5; 2 \cdot 10_0^5),$$

$$\tilde{\mu}_s = (\underline{\mu}_{s,0}, \mu_{s,1}, \bar{\mu}_{s,0}), \quad \tilde{E}_b = (\underline{E}_{b,0}, E_{b,1}, \bar{E}_{b,0}).$$

Величины  $\tilde{E}_s$ ,  $\tilde{\mu}_s$  представляют собой нечеткую форму записи вполне определенных величин  $E_s$ ,  $\mu_s$  (синглтонная модель). Необходимость такого представления обусловлена тем, что применение алгебры нечетких чисел требует единообразного представления величин. В данной статье используется алгебра нечетких чисел, которая является модифицированным расширением нечеткой арифметики [4]. Ее появление продиктовано новым качеством задачи и неприемлемыми оценками, отражающими физически неадекватный или неинтерпретируемый результат решения задач с использованием нечеткой арифметики [4]. Изменения в алгебре нечетких чисел коснулись представления всего множества операций, они представлены в виде функциональных операторов. Объем данной статьи не позволяет изложить все основные аксиомы и правила алгебры нечетких чисел.

Для определения  $M_{crc}$  воспользуемся 3-м уравнением системы (4).

$$\begin{aligned} \overline{M} &= \left( -\frac{\xi}{\varepsilon_b} \right)^2 \int_{\varepsilon_b}^{\varepsilon_{bt}} \bar{\psi}(\varepsilon) \varepsilon d\varepsilon + (1-\xi) \mu_s \bar{E}_s \varepsilon_{bt}; \\ \overline{M} &= \left( \frac{1-\xi}{\varepsilon_{bt}} \right)^2 \int_{\varepsilon_b}^{\varepsilon_{bt}} \bar{\psi}(\varepsilon) \varepsilon d\varepsilon + (1-\xi) \mu_s \bar{E}_s \varepsilon_{bt} = \\ &= (1-\xi)^2 \int_{\varepsilon_b}^{\varepsilon_{bt}} \bar{\psi}(\varepsilon) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bt}} d\left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bt}} \right) + (1-\xi) \mu_s \bar{E}_s \varepsilon_{bt}. \end{aligned}$$

Введем новую переменную  $\tau = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{bt}}$ , тогда

$$\overline{M} = (1-\xi)^2 \int_{\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bt}}}^1 \bar{\psi}(\varepsilon_{bt}\tau) \tau d\tau + (1-\xi) \mu_s \bar{E}_s \varepsilon_{bt}.$$

$$\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_{bt}} = \frac{\xi}{\xi-1} = -\zeta, \text{ следовательно}$$

$$\begin{aligned} \overline{M} &= \frac{1}{(1+\zeta)^2} \int_{-\zeta}^1 \bar{\psi}(\varepsilon_{bt}\tau) \tau d\tau + \frac{1}{1+\zeta} \mu_s \bar{E}_s \varepsilon_{bt} = \\ &= \frac{1}{(1+\zeta)^2} \int_0^1 [\bar{A} \varepsilon_{bt}^2 \tau^2 + \bar{B} \varepsilon_{bt} \tau] \tau d\tau + \frac{1}{(1+\zeta)^2} \int_{-\zeta}^0 \bar{E}_b \varepsilon_{bt} \tau^2 d\tau + \frac{1}{1+\zeta} \mu_s \bar{E}_s \varepsilon_{bt} = \\ &= \frac{1}{(1+\zeta)^2} \left[ \frac{\bar{A} \varepsilon_{bt}^2}{4} + \frac{\bar{B} \varepsilon_{bt}}{3} \right] + \frac{\bar{E}_b \varepsilon_{bt}}{(1+\zeta)^2} \frac{\zeta^3}{3} + \frac{1}{1+\zeta} \mu_s \bar{E}_s \varepsilon_{bt}. \end{aligned}$$

Формулы для вычисления  $\tilde{M}_{crc}$  (нечеткой величины) принимают вид:

$$\begin{aligned}\tilde{\zeta} &= \frac{\tilde{\mu}_s \tilde{\alpha}_s}{2} + \sqrt{\frac{\tilde{\mu}_s^2 \tilde{\alpha}_s^2}{4} + \tilde{\mu}_s \tilde{\alpha}_s + \frac{\tilde{E}_s}{\tilde{E}_b} \cdot \frac{\tilde{W}_{rt} \tilde{E}_s}{\tilde{E}_s^2 \tilde{\varepsilon}_{bt}^2}}; \\ \tilde{M}_{crc} &= \frac{\tilde{\varepsilon}_{bt}}{(\tilde{1} + \tilde{\zeta})^2} \left[ \frac{\tilde{B}}{3} + \frac{\tilde{A} \tilde{\varepsilon}_{bt}}{4} \right] + \frac{\tilde{E}_b \tilde{\varepsilon}_{bt}}{(\tilde{1} + \tilde{\zeta})^2} \frac{\tilde{\zeta}^3}{3} + \left( \frac{\tilde{1}}{\tilde{1} + \tilde{\zeta}} \right) \tilde{\mu}_s \tilde{E}_s \tilde{\varepsilon}_{bt}; \\ \tilde{M}_{crc} &= \tilde{M}_{crc} \cdot \tilde{\sigma}_0 \cdot \tilde{b} \cdot \tilde{h}_0^2.\end{aligned}\quad (7)$$

В дальнейших расчетах используем нечеткие величины, полученные в работе [5]:

$$\begin{aligned}\tilde{R}_{bt} &= (0,7197, 0,82, 1,0092); \\ \tilde{W}_{rt} &= (4,3986 \cdot 10^{-5}, 5,4797 \cdot 10^{-5}, 5,721 \cdot 10^{-5}); \\ \tilde{\varepsilon}_{bt} &= (7,58 \cdot 10^{-5}, 7,95 \cdot 10^{-5}, 8,15 \cdot 10^{-5}); \\ \tilde{E}_b &= (2,4865 \cdot 10^4, 2,7692 \cdot 10^4, 2,7692 \cdot 10^4); \\ \tilde{A} &= (-4,3833 \cdot 10^8, -2,9757 \cdot 10^8, -2,4814 \cdot 10^8); \\ \tilde{B} &= (2,6726 \cdot 10^4, 3,1242 \cdot 10^4, 4,2064 \cdot 10^4).\end{aligned}$$

В табл. 1, 2 приводятся результаты определения параметров  $\tilde{\zeta}$  и  $\tilde{M}_{crc}$ , и их дефазифицированных значений  $\zeta$  и  $M_{crc}$  (методом центра тяжести [4]) для балки с размерами:  $b = 0,1$  м;  $h_0 = 0,16$  м;  $l = 1,2$  м.

В табл. 1 приведены значения нечетких величин  $\tilde{\zeta}$  и  $\tilde{M}_{crc}$ , полученных с применением алгебры нечетких чисел по формулам (7), где исходными данными являлись нечеткие значения  $\tilde{R}_{bt}$ ,  $\tilde{W}_{rt}$ ,  $\tilde{\varepsilon}_{bt}$ ,  $\tilde{E}_b$ ,  $\tilde{A}$ ,  $\tilde{B}$ . Расчет выполнен для характерных коэффициентов армирования (рис. 4, 5).

В первой колонке табл. 2 приводятся дефазифицированные значения (методом центра тяжести [4]) нечетких величин  $\tilde{\zeta}$  и  $\tilde{M}_{crc}$ , найденных с

Таблица 1  
Результаты расчетов для различных значений  $\mu_s$   
с применением нечеткой алгебры

$\mu_s$	$\tilde{\zeta}$	$\tilde{M}_{crc}$
0,000	$\tilde{\zeta}_1 = (0,489; 0,560; 0,633)$	$\tilde{M}_{crc,1} = (1,061 \cdot 10^{-3}; 1,502 \cdot 10^{-3}; 2,380 \cdot 10^{-3})$
0,005	$\tilde{\zeta}_2 = (0,602; 0,668; 0,749)$	$\tilde{M}_{crc,2} = (1,089 \cdot 10^{-3}; 1,518 \cdot 10^{-3}; 2,312 \cdot 10^{-3})$
0,010	$\tilde{\zeta}_3 = (0,721; 0,782; 0,873)$	$\tilde{M}_{crc,3} = (1,132 \cdot 10^{-3}; 1,558 \cdot 10^{-3}; 2,292 \cdot 10^{-3})$

Таблица 2  
Сравнение величин  $\zeta$  и  $M$  после дефазификации  
на различных этапах вычислений

Дефазификация нечетких величин $\tilde{\zeta}$ и $\tilde{M}$ , найденных с использованием алгебры нечетких чисел		Результаты решения задачи в четкой постановке при исходных данных — дефазифицированных значениях нечетких величин $\tilde{R}_{bt}$ , $\tilde{E}_b$ , $\tilde{\varepsilon}_{bt}$ , $\tilde{W}_{rt}$ , $\tilde{A}$ , $\tilde{B}$	
$\zeta_1 = 0,560$	$M_1 = 1,648 \cdot 10^{-3}$	$\zeta_1 = 0,559$	$M_1 = 1,592 \cdot 10^{-3}$
$\zeta_2 = 0,673$	$M_2 = 1,640 \cdot 10^{-3}$	$\zeta_2 = 0,610$	$M_2 = 1,654 \cdot 10^{-3}$
$\zeta_3 = 0,792$	$M_3 = 1,661 \cdot 10^{-3}$	$\zeta_3 = 0,660$	$M_3 = 1,721 \cdot 10^{-3}$

Примечание.  $\zeta_1 = \zeta(\mu = 0)$ ,  $\zeta_2 = \zeta(\mu = 0,005)$ ,  $\zeta_3 = \zeta(\mu = 0,01)$ ;  $M_1 = M(\mu = 0)$ ,  $M_2 = M(\mu = 0,005)$ ,  $M_3 = M(\mu = 0,01)$ .

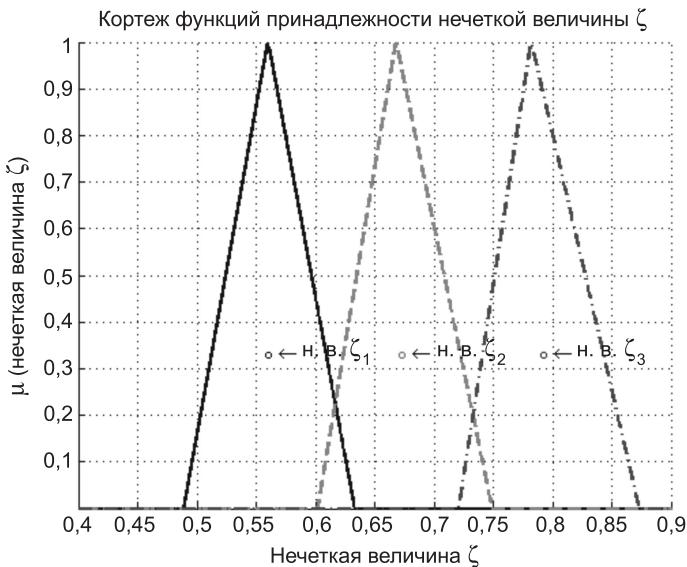


Рис. 4. Кортеж функций принадлежности нечеткой величины  $\zeta$  и их дефазифицированные значения

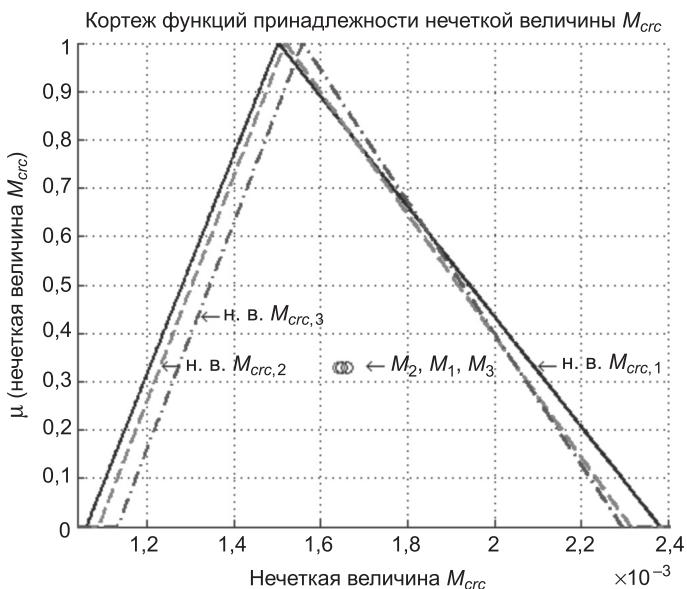


Рис. 5. Кортеж функций принадлежности нечеткой величины  $M$  и их дефазифицированные значения

использованием алгебры нечетких чисел. Дефазификация проводилась на последнем этапе после определения нечетких величин  $\zeta$  и  $\tilde{M}_{crc}$  при разных коэффициентах армирования. Во второй колонке табл. 2 приведены результаты решения задач в четкой постановке (определенны величины  $\zeta$  и  $M$  при разных коэффициентах армирования), где в качестве исходных данных приняты дефазифицированные значения нечетких величин  $\tilde{R}_{bt}$ ,  $\tilde{E}_b$ ,  $\tilde{\varepsilon}_{bt}$ ,  $\tilde{W}_{rt}$ ,  $\tilde{A}$ ,  $\tilde{B}$ .

Интересным для практического применения является отношение моды нечеткой величины  $\tilde{M}_{crc}$  (значение момента, для которого функция принадлежности равна 1) к значению момента, соответствующего левой

границе носителя  $\tilde{M}_{crc}$ . Это отношение можно для всех значений коэффициента армирования приближенно считать равным 1,4, соответственно обратное отношение  $\approx 0,72$ . Полученные результаты доказывают возможность установить единый коэффициент запаса по моменту образования трещины.

**Выводы.** Построен и реализован алгоритм определения изгибающего момента, соответствующего возникновению трещины в железобетонном элементе. Исходные данные для решения задачи представляются в виде нечетких величин, моды и носители которых определяются по результатам экспериментов.

Расчетные функции принадлежности дают вполне приемлемые для практического применения оценки момента трещинообразования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адищев, В.В. Основные положения энергетической теории сопротивления железобетона [Текст] / В.М. Митасов, В.В. Адищев // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 6. — С. 3–8.
2. Адищев, В.В. Определение коэффициентов трансформации эталонных диаграмм для изгибаемых и внецентренно сжатых железобетонных элементов [Текст] / В.В. Адищев, Э.В. Березина, Н.В. Ершова // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 7. — С. 73–81.
3. Адищев, В.В. Экспериментальная апробация метода трансформации эталонных диаграмм деформирования бетона при изгибе [Текст] / В.В. Адищев, Э.В. Березина, Н.В. Ершова // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 8–9. — С. 118–124.
4. Штоба, С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB [Текст] / С.Д. Штоба. — М. : Горячая линия – Телеком, 2007. — 288 с.
5. Адищев, В.В. Применение кластерного анализа для построения нечетких аппроксимаций диаграмм деформирования бетона [Текст] / В.В. Адищев, Д.С. Шмаков // Изв. вузов. Строительство. — 2012. — № 4. — С. 60–70.

*АДИЩЕВ Владимир Васильевич, д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*ШМАКОВ Дмитрий Сергеевич, асп.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено после доработки 26.03.12

**Adishchev Vladimir Vasilievich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Shmakov Dmitriy Sergeevich**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

#### DETERMINATION OF MOMENT OF PROCESS OF CRACKING SUCH AS FUZZY VALUE BY EXPERIMENTAL DATA

The work deals with the construction and implementation of the algorithm of determining the bending moment corresponding the occurrence of cracks in reinforced concrete element. Initial data for solving the problem are represented as fuzzy values with fashions and supports, which are determined by results of experiments. Calculated membership functions are giving quite acceptable for practical application of the assessment of moment crack formation.

**Key words:** unformalized problems, cluster analysis, fuzzy values, fuzzy logic, the bending reinforced concrete element, the moment of cracking.

## REFERENCES

1. Adishchev, V.V. Main provisions of the energy theory of resistance of reinforced concrete [Text] / V.M. Mitasov, V.V. Adishchev // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 6. — P. 3–8.
  2. Adishchev, V.V. Determination of the transformation of standard diagrams for bending and eccentrically compressed concrete elements [Text] / V.V. Adishchev, E.V. Berezina, N.V. Ershova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 7. — P. 73–81.
  3. Adishchev, V.V. Experimental testing of the method of transformation of the reference strain diagrams of concrete in bending [Text] / V.V. Adishchev, E.V. Berezina, N.V. Ershova // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 8–9. — P. 118–124.
  4. Shtovba, S.D. Designing of fuzzy systems by means of MATLAB [Text] / S.D. Shtovba. — M. : Hot line – Telecom, 2007. — 288 p.
  5. Adishchev, V.V. Application of cluster analysis for construction of fuzzy approximations of the deformation curves of concrete [Text] / V.V. Adishchev, D.S. Shmakov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 4. — P. 60–70.
-

## **СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ**

**УДК 691.327:666.97.035.56**

**А.Н. ВОЛОДЧЕНКО, В.С. ЛЕСОВИК**

### **АВТОКЛАВНЫЕ ЯЧЕЙСТЫЕ БЕТОНЫ НА ОСНОВЕ МАГНЕЗИАЛЬНЫХ ГЛИН**

Рассматривается возможность использования магнезиальных глин месторождения Архангельской алмазоносной провинции в качестве компонента вяжущего для получения автоклавных ячеистых бетонов. За счет высокой реакционной способности породообразующих минералов породы ускоряется синтез новообразований и формируется оптимальная микроструктура цементирующего соединения, что повышает прочность ячеистых бетонов при одновременном сокращении времени автоклавной обработки.

**Ключевые слова:** магнезиальные глины, известь, автоклавная обработка, микроструктура новообразований, ячеистые бетоны.

В настоящее время развитие промышленного производства находится на таком этапе развития, когда существенно обостряются экологические проблемы. Окружающая среда не может бесконечно долго выдерживать техногенный прессинг, что, безусловно, не может не отразиться на устойчивости системы «человек — материал — среда обитания». И в этом плане стройиндустрия вносит серьезный вклад, потому что промышленность строительных материалов — это около 10 % потребляемой энергии в мире, порядка 12 % работающих и большие объемы выбросов в атмосферу [1].

Повышение комфорта жилья непосредственно связано с разработкой новых материалов, сочетающих в себе улучшенные теплоизоляционные характеристики с высокими эксплуатационными и технико-экономическими показателями, а также отвечающие требованиям экологической безопасности. В полной мере этим требованиям отвечают автоклавные ячеистые бетоны. Особо актуальной становится задача использования для их производства техногенного сырья.

Цель настоящей работы — разработка технологии производства и изучение свойств автоклавных ячеистых бетонов с использованием нетрадиционного сырья, в том числе магнезиальных глин.

Известны положительные результаты использования ультраосновных горных пород магнезиального состава для производства автоклавных силикатных материалов [2]. Установлена возможность использования вскрытых пород и, в частности, магнезиальных глин Архангельской алмазоносной провинции (AAP) в качестве компонента вяжущего силикатных автоклавных материалов [3, 4].

В исследованиях использовалась магнезиальная глина, отобранная из керна детальной разведки на месторождении AAP [4]. Глина представ-

ляет собой плотную породу серого цвета с зеленым оттенком, раковистым изломом и слоистой текстурой. В пробе по гранулометрическому составу преобладают алевритопелитовые частички (73,82 мас. %). Химический состав породы следующий, мас. %:  $\text{SiO}_2$  — 45,3,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — 6,24,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — 8,14,  $\text{CaO}$  — 8,86,  $\text{MgO}$  — 18,92,  $\text{TiO}_2$  — 0,65,  $\text{K}_2\text{O}$  — 2,16,  $\text{Na}_2\text{O}$  — 2,84, п.п. — 6,16.

Изучаемую породу вводили в сырьевую смесь в виде вяжущего, получаемого совместным помолом породы, извести и кварцевого песка до удельной поверхности 500–550  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Содержание глины составляло 5–15 мас. % от сухой смеси. Активность смеси — 10, 12 и 14 %. Отношение кремнеземистого компонента к вяжущему  $C$  было принято 1,0 и 1,5. В качестве газообразователя использовали алюминиевую пудру марки ПАП-1. Водотвердое отношение В/Т принималось из условия обеспечения расплыва растворной смеси по Суттарду 19–20 см при температуре 35–40 °С. Автоклавную обработку проводили при давлении насыщенного пара 1,0 МПа по режиму: подъем давления пара — 1,5 ч, время изотермической — 6 ч, сброс давления — 1,5 ч.

Результаты физико-механических испытаний образцов представлены в табл. 1 и на рис. 1. При  $C = 1$  с увеличением содержания глины до 10 мас. % при активности сырьевой смеси 10 и 12 % предел прочности при сжатии образцов возрастает соответственно на 27,3 % (до 4,24 МПа) и на 41,4 % (до 4,88 МПа) (см. рис. 1, кривая 1 и 2). Дальнейшее увеличение содержания породы в сырьевой смеси до 15 мас. % незначительно снижает прочность образцов. Оптимальное содержание породы, обеспечивающее максимальную прочность образцов, составляет 10–15 мас. %. Повышение активности сырьевой смеси до 14 % снижает прочность образцов (см. рис. 1, кривая 3).

При  $C = 1,5$  (см. рис. 1, кривые 4–6) прочность повышается как с увеличением содержания глины до 15 мас. %, так и с увеличением актив-

#### Физико-механические характеристики силикатных образцов

Физико-механические характеристики	Содержание магнезиальной глины, мас. %							
	0		5		10		15	
	$C = 1$	$C = 1,5$	$C = 1$	$C = 1,5$	$C = 1$	$C = 1,5$	$C = 1$	$C = 1,5$

#### Содержание активной $\text{CaO} — 10 \%$

Предел прочности при сжатии, МПа	3,33	2,80	3,73	3,23	4,24	3,68	4,16	3,93
Средняя плотность, $\text{kg/m}^3$	698	712	707	697	693	718	705	710
Водопоглощение, %	46,1	48,1	47,8	52,2	44,7	49,1	48,1	50,3
Коэффициент размягчения	0,83	0,84	0,88	0,82	0,87	0,88	0,84	0,81

#### Содержание активной $\text{CaO} — 12 \%$

Предел прочности при сжатии, МПа	3,45	3,21	3,86	3,58	4,88	4,21	4,84	4,26
Средняя плотность, $\text{kg/m}^3$	715	723	688	731	703	714	710	710
Водопоглощение, %	47,3	48,9	42,7	44,25	45,2	46,9	41,9	46,1
Коэффициент размягчения	0,81	0,77	0,85	0,85	0,91	0,82	0,87	0,85

#### Содержание активной $\text{CaO} — 14 \%$

Предел прочности при сжатии, МПа	3,50	3,41	4,18	3,80	4,55	4,46	4,31	4,48
Средняя плотность, $\text{kg/m}^3$	706	699	717	713	700	703	697	691
Водопоглощение, %	46,2	45,2	44,1	47,7	41,9	45,9	46,5	48,3
Коэффициент размягчения	0,77	0,81	0,80	0,83	0,83	0,85	0,78	0,83

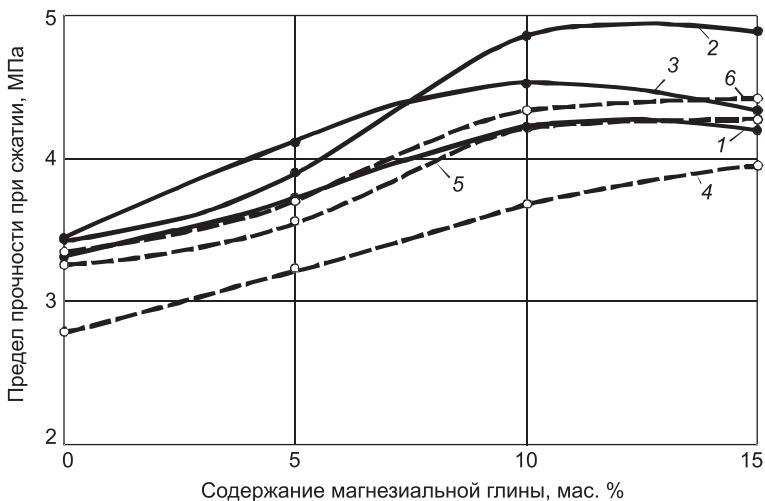


Рис. 1. Предел прочности при сжатии образцов ячеистого бетона в зависимости от содержания магнезиальной глины

отношение кремнеземистого компонента к вяжущему  $C$ : 1—3 — 1; 4—6 — 1,5;  
содержание  $\text{CaO}_{\text{акт}}$ , %: 1, 4 — 10; 2, 5 — 12; 3, 6 — 14

ности сырьевой смеси. При этом более низкие значения прочности, полученные для составов при  $C = 1,5$ , вероятно, обусловлены формированием менее прочной структуры цементирующего соединения.

Четкой закономерности в изменении водопоглощения в зависимости от содержания глины не наблюдается. Коэффициент размягчения ячеистых бетонов при добавке глины повышается в пределах 0,78–0,91, что свидетельствует о водостойкости полученного материала. Максимальная водостойкость ( $K_{\text{раз}} = 0,91$ ) соответствует образцам при  $C = 1$ , содержащим 10 мас. % глины и активности сырьевой смеси 12 % (см. табл. 1). Этому составу соответствует также максимальная прочность ячеистого бетона (см. рис. 1, кривая 2). Следовательно, в этом случае формируется оптимальная микроструктура цементирующего соединения, обеспечивающая высокие физико-механические показатели ячеистого бетона.

Изучено влияние времени автоклавной обработки на прочность ячеистых бетонов. Исследования проводились для составов с содержанием глины 15 мас. % при отношении кремнеземистого компонента к вяжущему  $C$ , равном 1. Количество активной  $\text{CaO}_{\text{акт}}$  в сырьевых смесях составляло 12 и 14 %. Время изотермической выдержки в автоклаве изменялось от 2 до 6 ч. Средняя плотность образцов в пределах 700–720 кг / м<sup>3</sup>. Результаты испытаний представлены на рис. 2.

С увеличением времени изотермической выдержки с 2 до 6 ч прочность известково-песчаных образцов с содержанием  $\text{CaO}_{\text{акт}}$  12 и 14 % возрастает соответственно с 2,55 до 3,87 МПа (в 1,52 раза) и с 2,39 до 4,41 МПа (в 1,84 раза). Причем при времени изотермической выдержки до 5 ч прочность составов с активностью 12 % незначительно выше составов с активностью 14 % (см. рис. 2, кривая 1 и 2).

Прочность образцов с содержанием глины 15 мас. % после 2 ч изотермической выдержки существенно выше известково-песчаных образцов и составляет 3,7 МПа (12 %  $\text{CaO}_{\text{акт}}$ ) и 3,82 МПа (14 %  $\text{CaO}_{\text{акт}}$ ). Увеличение времени изотермической выдержки до 6 ч повышает прочность этих образцов в меньшей степени, чем известково-песчаных, соответственно в

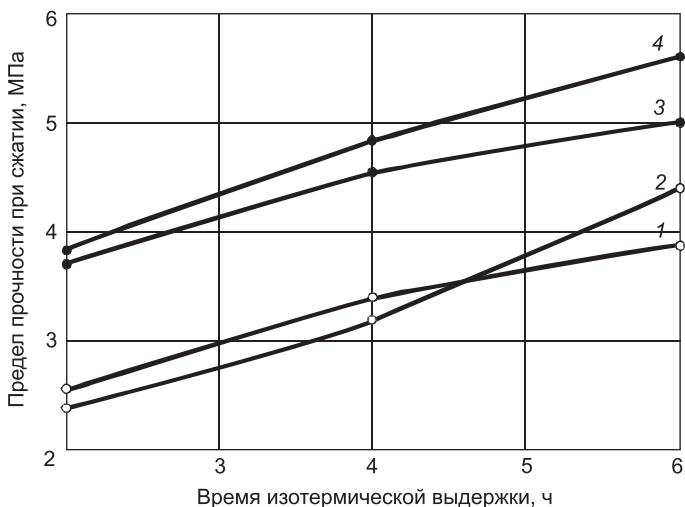


Рис. 2. Предел прочности при сжатии образцов ячеистого бетона в зависимости от времени изотермической выдержки

1, 2 — контрольные; 3, 4 — с содержанием 15 мас. % магнезиальной глины; содержание  $\text{CaO}_{\text{акт}}$ , %: 1, 3 — 12; 2, 4 — 14

1,35 и 1,47 раза (см. рис. 2, кривая 3 и 4). При времени изотермической выдержки 4 ч прочность образцов с глиной, содержащих 12 и 14 %  $\text{CaO}_{\text{акт}}$ , выше прочности контрольных образцов соответственно на 32 и 52 %. Следовательно, магнезиальная глина повышает прочность ячеистых бетонов, в том числе и при сокращении времени автоклавной обработки.

Состав новообразований изучали термографическим и рентгенографическим методом анализа (рис. 3).

Для всех составов характерен эндотермический эффект в интервале температур 110–140 °C, соответствующий удалению слабо связанной воды гелевидного цементирующего вещества (см. рис. 3, а). Экзотермический эффект при 300–320 °C обусловлен перекристаллизацией гелевидного цементирующего вещества. Эндотермический эффект при 570 °C соответствует полиморфному превращению кварца. На термограммах известково-песчаных образцов и с содержанием глины 15 мас. %, запаренных при 2 ч изотермической выдержки, отмечается эндотермический эффект при 480 °C, который свидетельствует о наличии свободного гидроксида кальция (рис. 3, а, кривая 1 и 3). С увеличением времени запаривания этот эндотермический эффект исчезает. Эндотермический эффект при 770–780 °C связан с разложением карбоната кальция, который фиксируется по рефлексам 3,04; 2,287; 1,88 Å на рентгенограммах (см. рис. 3, б). Эндотермический эффект при 650–680 °C соответствует, вероятно, разложению карбоната магния.

На термограммах всех образцов присутствует экзотермический эффект при 820–840 °C, который соответствует низкоосновным гидросиликатам кальция группы CSH(B). Рентгенографическим анализом это подтвердить сложно, так как основной рефлекс CSH(B), соответствующий 3,04 Å, совпадает с основным рефлексом карбоната кальция.

Результаты микроскопических исследований показывают, что в силикатных образцах с содержанием магнезиальной глины новообразования,

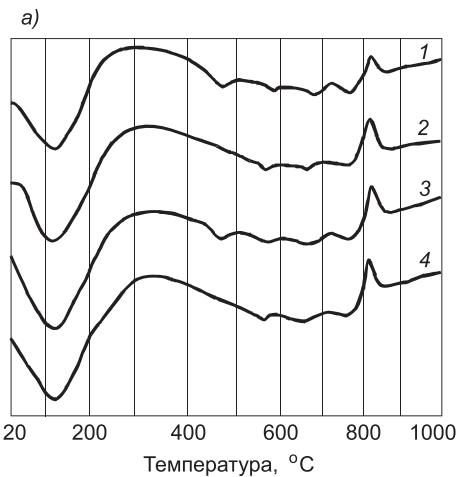
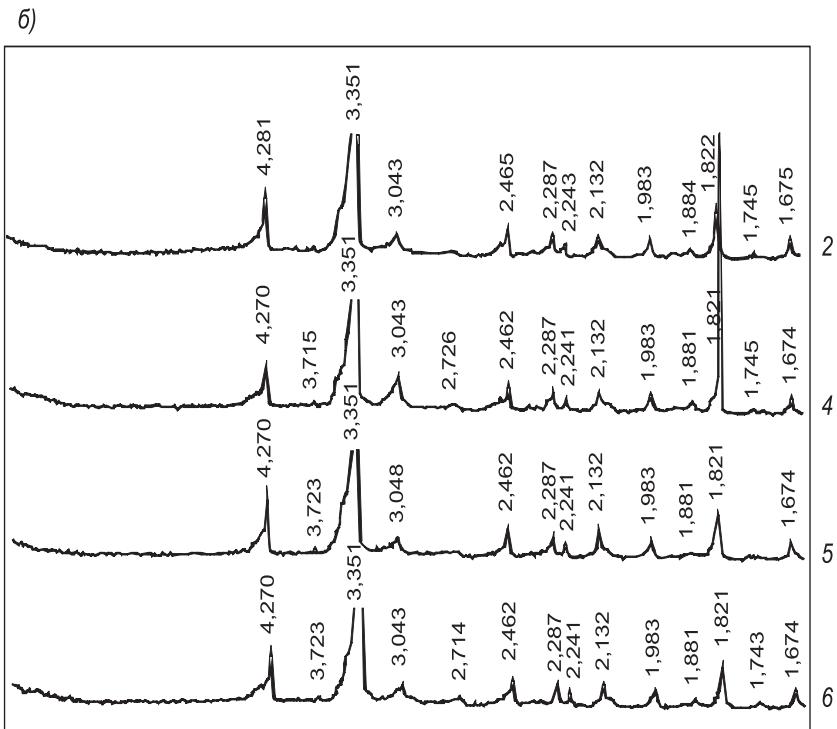


Рис. 3. Термограммы (а) и рентгенограммы (б) образцов с содержанием 14 %  $\text{CaO}_{\text{акт}}$  содержание магнезиальной глины, мас. %: 1, 2, 5 — 0; 3, 4, 6 — 15; длительность изотермической выдержки, ч: 1, 3 — 2; 2, 4 — 4; 5, 6 — 6



также как и в известково-песчаных (контрольных) образцах, имеют форму закручивающихся лепестков, которые, вероятно, относятся к низкоосновным гидросиликатам кальция типа CSH(B) (рис. 4).

Рост прочности образцов с увеличением времени автоклавной обработки определяется повышением степени связывания извести и соответственно увеличением количества низкоосновных гидросиликатов кальция.

В известково-песчаных образцах с добавкой магнезиальной глины также возможно образование рентгеноаморфных гидросиликатов магния типа серпентина. Однако сложность определения гидросиликатов магния термографически заключается в том, что экзотермический эффект при 820–825 °С совпадает с соответствующим экзотермическим эффектом низкоосновных гидросиликатов кальция.

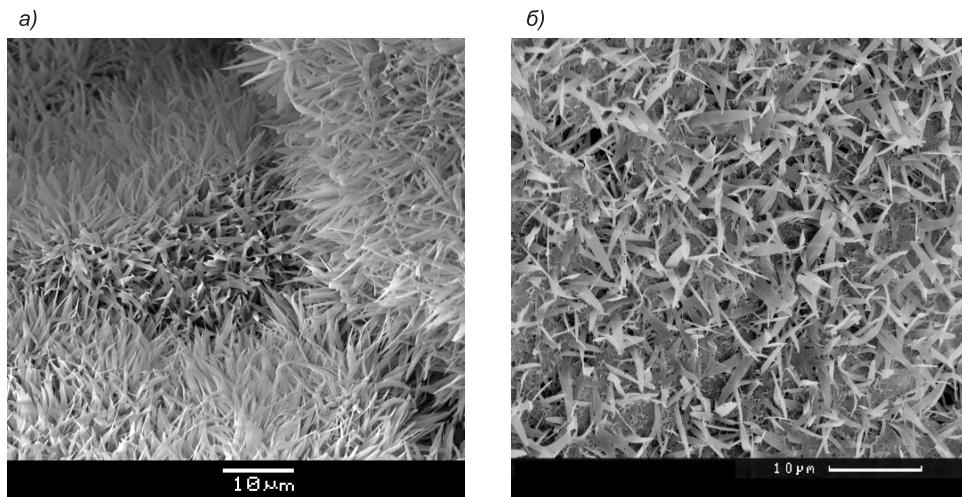


Рис. 4. Микроструктура образцов, автоклавированных с изотермической выдержкой 4 ч, РЭМ  
а — известково-песчаные; б — содержание 15 мас. % глины

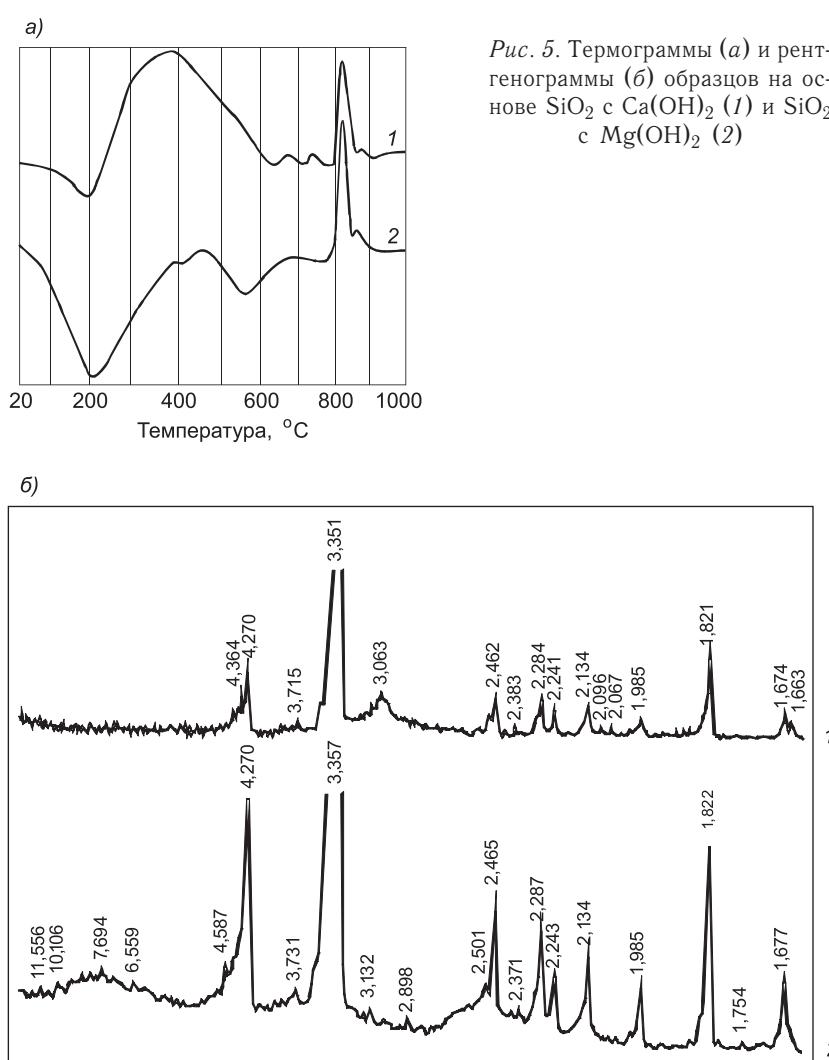


Рис. 5. Термограммы (а) и рентгенограммы (б) образцов на основе  $\text{SiO}_2$  с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (1) и  $\text{SiO}_2$  с  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  (2)

Для изучения продуктов реакции в системах  $MgO-SiO_2-H_2O$  и  $CaO-SiO_2-H_2O$  были исследованы образцы, полученные из сырьевых смесей на основе кварцевого песка с оксидом магния и оксидом кальция. В условиях нашего эксперимента при изотермической выдержке 6 ч и давлении автоклавной обработки 1,0 МПа в системе  $MgO-SiO_2-H_2O$  было обнаружено образование рентгеноаморфных гидросиликатов магния, экзоэффект при  $820^{\circ}C$  (рис. 5, а, кривая 2).

В системе  $CaO-SiO_2-H_2O$  при тех же условиях образование гидросиликатов кальция группы CSH(B) определяется как термографическим (экзоэффект при  $825^{\circ}C$ ), так и рентгенофазовым (3,063 Å) (рис. 5, б, кривая 1) методами анализа.

Таким образом, на примере исследования магнезиальной глины месторождений Архангельской алмазоносной провинции показана возможность использования нетрадиционного сырья в качестве компонента вяжущего для получения автоклавных ячеистых бетонов. За счет высокой реакционной способности породообразующих минералов ускоряется синтез новообразований и формируется оптимальная микроструктура цементирующего соединения, что позволяет повысить прочность ячеистых бетонов при одновременном сокращении времени автоклавной обработки. Кроме того, вследствие высокой дисперсности глины сокращаются затраты энергии на приготовление вяжущего, получаемого совместным помолом глины, песка и извести. Экономия энергозатрат на производство ячеистых бетонов составит 25–30 %. Использование нетрадиционного сырья позволит не только существенно расширить сырьевую базу производства автоклавных ячеистых бетонов и снизить экологический прессинг на окружающую среду, но и получать эффективные, экологически чистые строительные материалы, позволяющие создать комфортные условия проживания и тем самым способствовать оптимизации системы «человек — материал — среда обитания».

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Лесовик, В.С. Геоника. Предмет и задачи: монография [Текст] / В.С. Лесовик. — Белгород : Изд-во БГТУ, 2012. — 213 с.
- Прокофьева, В.В. Конструирование строительных материалов на основе нетрадиционного сырья [Текст] / В.В. Прокофьева, З.В. Багаутдинов, В.В. Ионина // Достижения строительного материаловедения : сб. науч. ст., посвящ. 100-летию со дня рожд. П.И. Баженова. — Санкт-Петербург : «ООО “Изд-во ОМ-Пресс”», 2004. — С. 57–62.
- Володченко, А.Н. Силикатные материалы на основе вскрышных пород архангельской алмазоносной провинции [Текст] / А.Н. Володченко, Р.В. Жуков, С.И. Алфимов // Изв. вузов. Сев.-Кавказ. регион. Техн. науки. — Новочеркасск, 2006. — № 3. — С. 67–70.
- Володченко, А.Н. Особенности взаимодействия магнезиальной глины с гидроксидом кальция при синтезе новообразований и формирование микроструктуры [Текст] / А.Н. Володченко // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. — 2011. — № 2. — С. 51–55.

*ВОЛОДЧЕНКО Анатолий Николаевич, канд. техн. наук, доц.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
ЛЕСОВИК Валерий Станиславович, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.  
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

Получено 23.03.12

**Volodchenko Anatoly Nikolaevich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

**Lesovik Valery Stanislavovich**, a corresponding member of the Russian Academy of Architecture and Civil Engineering, doctor of technical sciences, professor, Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

## **AUTOCLAVED AERATED CONCRETE BASED ON MAGNESIUM CLAYS**

There is considered the possibility of using magnesium clay deposits of the Arkhangelsk diamond province as a component of the binder to produce autoclaved aerated concrete. Due to the high reactivity of the rock-forming minerals of the rocks, the synthesis of neoformations is accelerated and the optimal microstructure of cementing compounds is formed, which increases the strength of cellular concretes, while reducing the time of autoclaving.

**Key words:** magnesium clay, lime, autoclave processing, microstructure neoformations, cellular concrete.

### REFERENCES

1. Lesovik, V.S. Geonika. The Object and Purpose : a monograph [Text] / V.S. Lesovik. — Belgorod : Unit BSTU, 2012. — 213 p.
2. Prokofieva, V.V. Construction of Building Materials Based on Non-conventional Raw Materials [Text] / V.V. Prokofieva, Z.V. Bagautdinov, V.V. Ionina // Advances of Construction Material : a collection of Research Papers Dedicated to the 100<sup>th</sup> Anniversary of birth P.I. Bazhenov. — St. Petersburg : «Company OM-PressPublishing», 2004. — P. 57–62.
3. Volodchenko, A.N. Silicate Materials on the Basis of Overburden Arkhangelsk Diamond Province [Text] / A.N. Volodchenko, R.V. Zhukov, S.I. Alfimov // Trans. North-Caucasian region. Engineering. — Novocherkassk, 2006. — N 3. — P. 67–70.
4. Volodchenko, A.N. Features of the interaction of magnesium clay with calcium hydroxide in the synthesis of microstructures and the formation of tumors [Text] / A.N. Volodchenko // Herald BSTU V.G. Shukhov. — 2011. — N 2. — P. 51–55.

УДК 691.327 : 666.97-16

В.И. КАЛАШНИКОВ, Д.М. ВАЛИЕВ

## УСАДОЧНЫЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПРОПАРИВАЕМЫХ ПОРОШКОВО-АКТИВИРОВАННЫХ ПЕСЧАНЫХ БЕТОНОВ

Приведены прочности порошково-активированного песчаного бетона и изучены усадочные деформации. Произведено сравнение усадочных деформаций при нормальном твердении порошково-активированного песчаного бетона и при тепловой обработке.

Ключевые слова: усадка бетона, малоцементный бетон, тепловая обработка, активация порошками, удельный расход цемента, микрокремнезем.

В настоящее время технология строительства предполагает производство крупногабаритных конструкций, рассчитываемых на долгий срок службы. Для таких задач требуются бетоны, превосходящие существующие по эксплуатационным характеристикам. Порошково-активированные мелкозернистые бетоны (ПАМБ) отличаются высокой прочностью на сжатие. Однако при изготовлении предварительно-напряженных несущих конструкций важное значение приобретает усадка бетона. Значения усадки используются при назначении уровня предварительного напряжения арматурной стали в предварительно-напряженных несущих конструкциях. И неполный учет ее чреват потерей предварительного натяжения арматуры в теле бетона. Усадка составов ПАМБ существенно ниже усадки традиционных бетонов. Это может объясняться низкой влажностью (10 %) и небольшим объемом капиллярных пор в бетоне [1]. Сопоставляя данные о усадочных деформациях и составе бетона, можно выделить пропорции компонентов, позволяющие добиться меньшей усадки.

Во всех составах использовался цемент М 500 ДО (Ц), песок кварцевый молотый ( $\Pi_m$ ), песок тонкий фракции 0,16–0,63 мм ( $\Pi_t$ ), песок-заполнитель ( $\Pi_3$ ), гиперпластификатор Melflux 2651F с содержанием его 0,9 % от цемента, гранулированный микрокремнезем (МК), активированный диатомит (ДА). Мелкозернистые песчаные бетоны состава 1:3 изготавливались на рядовом мытом песке  $M_{kp} = 1,7$ .

Деформации усадки определялись по стандартной методике ГОСТ 24544–81. Для определения усадки в торцевые поверхности образцов заформовывались репера из нержавеющей стали.

Образцы хранились во влажных условиях в течение 28 сут, затем помещались на воздух с естественно колеблющейся переменной относительной влажностью воздуха, преимущественно в диапазоне 55–70 %, и фиксировали уменьшение размеров образцов до стабилизации их изменений.

Сроки испытания призм  $100 \times 100 \times 400$  мм могут продолжаться 5 и более месяцев при относительной влажности воздуха  $\theta = 60 \pm 5\%$  и температуре  $t = 20 \pm 2$  °С. Завершение испытаний в соответствии с ГОСТ определяется по минимальному приросту последующих усадочных де-

формаций, не превышающему точность измерения. В связи с очень малой ценой деления индикаторов часового типа, равной 10 мкм, точность измерения приращений усадки очень высока и составляет по визуальному отчету 2–3 мкм. Поэтому усадка по рекомендуемому критерию точности может продолжаться в течение 1–2 лет и более. Еще О.Я. Берг рекомендовал проведение испытаний на усадку в течение 1 года [2].

Для оценки усадочных деформаций изготавливали образцы-призмы размерами  $100 \times 100 \times 400$  мм. На внутренние торцевые поверхности форм крепили реперы из нержавеющей стали с анкерующими отгибами и все формы заливали порошково-активированной бетонной смесью. Образцы хранились во влажностных условиях в двойных полиэтиленовых мешках. После 28-суточного хранения образцы-призмы устанавливались в измерительные ячейки с индикатором часового типа. Измерения осуществлялись через 28 сут нормального твердения (н.у.). Для бетонов с тепловлажностной обработкой (ТВО) продолжительностью 10 ч усадку измеряли после 27 сут дополнительного твердения.

После окончания измерений усадки образцы погружались в воду для определения набухания и водопоглощения. Водопоглощение определялось как от массы образцов в абсолютно сухом состоянии, так и от массы образцов в воздушно-сухом состоянии, достигнутом после окончания усадки.

Составы бетонов представлены в табл. 1. Приведенные составы бетонов на реакционно-порошковой связке с микрокремнеземом и без него имели различные значения жесткости и подвижности, соответствующие составам, приведенным в [3].

В табл. 2 приведено водопоглощение базовых образцов по массе. Для сравнения представлен состав бетона старого поколения без СП (МБ-1),

Таблица 1  
Составы традиционного и порошково-активированных песчаных бетонов

Составы бетонов, №	1	2	3	4	5
Наименование компонентов бетонной смеси	МБ-1	ПАМБ 46	ПАМБ 48	ПАМБ 49	ПАМБ 145ФР
Цемент, кг	500	614	475	475	285
МК, кг (% от Ц)	—	60,5(10)	—	—	—
ДА, кг (% от Ц)	—	—	—	—	77(27)
$\Pi_m$ , кг	—	310	360	360	149
$\Pi_t$ фр. 0,16–0,63 мм, кг	1338	310	369	369	521
$\Pi_3$ фр. 0,63–5 мм, кг	162	968	992	992	—
Отсев от ПГС (Казань) фр. 0,63–5 мм, кг	—	—	—	—	1047
ГП Melflux 2651F, кг	—	5,6	4,3	4,3	2,6
Вода, л	248	189	158	134	175
В/Ц	0,50	0,30	0,33	0,29	0,62
В/Т	0,124	0,080	0,072	0,063	0,084
В/(Ц+МК)	—	0,278	—	—	—
Консистенция смесей	Ж-2	П-1	П-5	Ж-1	П-2
Удельный расход при н.у., $\Pi_R^{\text{уд}}$ , кг/МПа	15,6	4,8	4,3	4,2	4,0
Удельный расход после ТВО, $\Pi_R^{\text{уд}}$ , кг/МПа	19,5	5,0	4,5	4,3	4,8

Таблица 2

## Физико-технические характеристики бетонов

Составы бетонов, №			1		2		3		4		5		
Наименование характеристик бетона			МБ-1		ПАМБ 46		ПАМБ 48		ПАМБ 49		ПАМБ 145ФР		
			н.у.	ТВО	н.у.	ТВО	н.у.	ТВО	н.у.	ТВО	н.у.	ТВО	
Прочность на сжатие, МПа	Сут	1	15,7	21,4	80	108,4	42,1	71,3	46,8	102,8	28,5	50,8	
		28	32,0	25,6	129,2	124,0	110,4	106,0	114,8	111,2	71,3	59,4	
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Сут	1	—	6,5	10,1	12,4	7,8	10,4	12,3	11	6,4	10,0	
		28	8,0	6,9	16,7	12,4	10,7	10,5	12,9	12	11,5	11,7	
Плотность во влажном состоянии, кг/м <sup>3</sup>			2396	2388	2378	2403	2391	2399	2389	2398	2178	2206	
Плотность в воздушно-сухом состоянии, кг/м <sup>3</sup>			2247	2225	2324	2303	2338	2343	2359	2344	2143	2144	
В/Ц			0,50		0,30		0,33		0,29		0,62		
Усадка, мм/м (сут)			—	—	0,36 (229)	0,37 (246)	0,35 (219)	0,35 (219)	0,16 (186)	0,19 (219)	0,40 (205)	0,39 (205)	
Удельная усадка на единицу объема потерянной влаги, мм/%			—	—	0,24 (229)	0,22 (246)	0,18 (219)	0,15 (219)	0,12 (186)	0,10 (219)	0,15 (205)	0,12 (205)	
Водопоглощение от массы воздушно-сухого состояния (сут), %			4,62 (28)	4,8 (28)	0,80 (193)	1,77 (193)	1,67 (203)	1,9 (193)	1,29 (193)	1,77 (193)	1,77 (22)	1,94 (22)	
Водопоглощение от массы абсолютно сухого состояния (сут), %			—	—	—	—	2,5 (203)	2,8 (193)	2,3 (193)	—	—	—	

имеющий прочность при сжатии при нормальном твердении через 28 сут 32 МПа и твердеющий при ТВО на 1-е сутки 21,4 МПа.

Мелкозернистые бетоны при оценке активности портландцемента по ГОСТ 310.4–81 из смесей нормальной консистенции (В/Ц = 0,4) имеют усадку через 3 мес в 1,6–1,7 раза, а через 5 мес — в 1,9–2,0 раза выше, чем в 28 сут. При этом водопоглощение через 28 сут по массе образцов воздушно-сухого состояния состава 1 было 4,62 и 4,8 % соответственно при н.у. и ТВО. Коэффициент эффективности при пропаривании у бетона составил 0,66, что соответствует II группе цементов по эффективности пропаривания. Прочность ПАМБ 46 была самой высокой как при нормальных условиях твердения, так и при ТВО. В структуре бетона присутствовало небольшое количество воздушных пор. Высокая прочность достигнута за счет оптимального соотношения компонентов и получения подвижности смеси, достаточной для минимального вовлечения воздушных пор.

В призмах ПАМБ 46 за период усадки в 150 сут усадочные деформации составили 0,35 мм/м, а за период в 200 сут приблизились к 0,36 мм/м.

Бетон без микрокремнезема (ПАМБ 48) имеет меньшую усадку, чем с МК (ПАМБ 46). Объяснить низкую усадку можно исключением из состава высокодисперсного микрокремнезема. Авторы статьи [4] С.М. Гупта, В.К. Сехгал, С.К. Каушик в результате исследований также выявили, что деформация усадки бетона с заменой 10 % цемента на золу или микрокремнезем увеличивается (от 6 до 10 % в зависимости от возраста). При пропаривании деструктивные процессы развиваются интенсивнее,

чем при н.у. Поэтому по сравнению с усадкой при н.у. усадка пропаренного бетона выше на 19 %. На основе ранее разработанных составов был изготовлен состав ПАМБ 145ФР с меньшим содержанием цемента. При фракционировании песка и малом содержании цемента (ПАМБ 145ФР) достигнут достаточно высокий условный коэффициент трещиностойкости ( $R_{изг}/R_{сж}$ ) 0,16 и 0,197 при н.у. и ТВО соответственно. Усадка такого бетона по сравнению с высокопрочными порошково-активированными бетонами выше и составляет 0,40 мм/м при н.у. и 0,39 мм/м при пропаривании. Но она и существенно ниже по сравнению с усадкой традиционных бетонов.

В.Р. Фаликманом с авторами<sup>1</sup> исследовалась усадка высокопрочных мелкозернистых бетонов с  $R_{сж} = 92\text{--}108$  МПа. Полученные значения усадки их (0,3–0,5 мм/м) можно было бы считать сопоставимыми с усадкой порошково-активированных бетонов, если бы она была определена в соответствии с ГОСТ. Усадка определялась через 28 сут, что недопустимо. Усадочные деформации, определенные в 28 сут в 1,5–1,6 раза меньше, чем через 3 мес, и в 1,7–1,8 раза — чем через 5 мес.

Сделать адекватный анализ данных о усадочных деформациях позволяет работа С.С. Каприелова и др.<sup>2</sup> Усадка высокопрочного бетона с модификатором МБ-50С, определенная по ГОСТ 24544, составила для песчаных бетонов от 0,688 до 0,77 мм/м ( $68,8\text{--}77 \cdot 10^{-5}$ ) и для щебеночного бетона 0,36 мм/м. То есть усадка щебеночного бетона с модификатором МБ-50С соизмерима с усадкой ПАМБ 46 нормального твердения. Можно предположить, что к более высоким показателям усадочной деформации приводит большой расход цемента и реакционно-активных добавок.

В статье Н.И. Карпенко, Ю.В. Зайцева, Г.Э. Окольниковой, А.А. Андриянова<sup>3</sup> в ходе экспериментального определения физико-механических свойств высокопрочных бетонов был выявлен процесс набора прочности после 60 сут твердения. Поэтому для нашей работы важной частью исследования ПАМБ было определение долговременной прочности. Образцы ПАМБ 48, 49 были испытаны на 500-е сутки после изготовления. Как видно из рис. 1, понижения прочности мелкозернистых бетонов с порошковой активацией (без микрокремнезема) не наблюдалось. Повышение прочности по сравнению с 28 сут составило для бетона ПАМБ 48 при н.у. — на 17 % и с ТВО — на 28 %, а для бетона ПАМБ 49 при н.у. — на 26 %. Данные долговременных испытаний свидетельствуют о том, что на 500-е сутки конструктивные процессы в бетонах существенно превосходят деструктивные. Однако кинетика нарастания прочности бетона на сжатие замедляется (см. рис. 1).

В данной работе проведена математическая обработка результатов усадочных деформаций бетонов. Установлены зависимости капиллярной

<sup>1</sup> Фаликман В.Р., Сорокин Ю.В., Калашников О.О. Строительно-технические свойства особо высокопрочных быстротвердеющих бетонов // Бетон и железобетон. 2004. № 5. С. 5–10.

<sup>2</sup> Каприелов С.С., Карпенко Н.И., Шейфельд А.В., Кузнецов Е.Н. Влияние органоминерального модификатора МБ-50С на структуру и деформативность цементного камня и высокопрочного бетона // Бетон и железобетон. 2003. № 3. С. 2–7.

<sup>3</sup> Карпенко Н.И., Зайцев Ю.В., Окольникова Г.Э., Андриянов А.А. Экспериментальное определение физико-механических свойств и параметров механики разрушения ультравысокопрочных бетонов // Научные труды РААСН «Фундаментальные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2010 году». М.; Орел, 2011. С. 242–248.

усадки от возраста нормально твердеющих и пропаренных бетонов с МК и без него:

$$\varepsilon = \frac{a \cdot b + c \cdot \tau^d}{b + \tau^d},$$

где  $a, b, c, d$  — эмпирические коэффициенты,  $\tau$  — возраст бетона.

Значения эмпирических коэффициентов приведены в табл. 3.

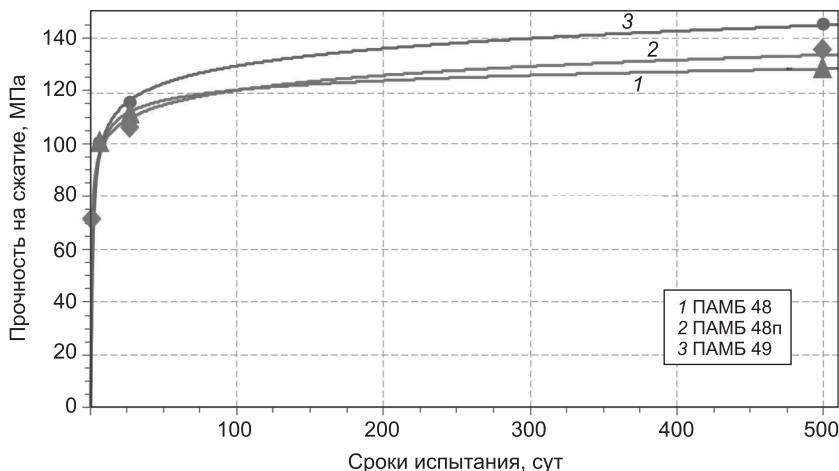


Рис. 1. Кинетика твердения порошково-активированных бетонов

Таблица 3

**Значения эмпирических коэффициентов**

Составы бетонов	Нормальное твердение				Тепловлажностная обработка			
	$a$	$b$	$c$	$d$	$a$	$b$	$c$	$d$
ПАМБ 46	$-4,14 \cdot 10^{-5}$	10,4497	0,5614	0,5496	0,0065	14,702	0,5888	0,5981
ПАМБ 48	-0,0008	6,5074	0,4275	0,6053	0,0024	8,9168	0,4147	0,7018
ПАМБ 49	-0,0008	21,157	0,1759	0,9604	-0,001	3,6408	0,2031	0,6925
ПАМБ 145ФР	0,0006	8,1238	1,0290	0,3121	0,0003	3,5152	0,5567	0,6912

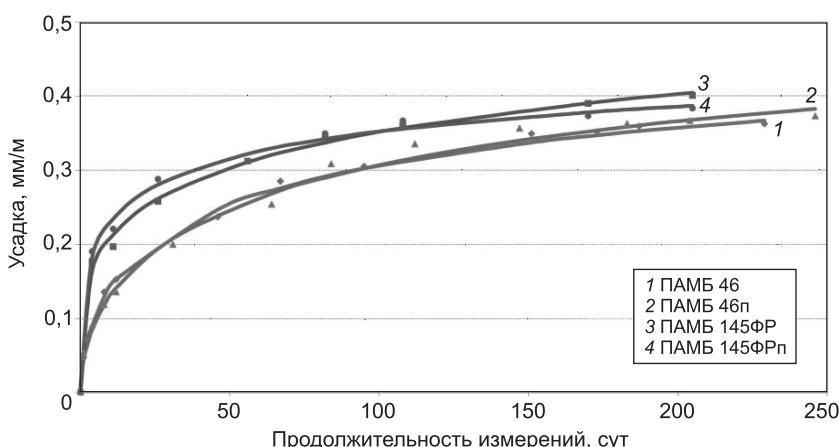


Рис. 2. Усадка порошково-активированных мелкозернистых бетонов с микрокремнеземом

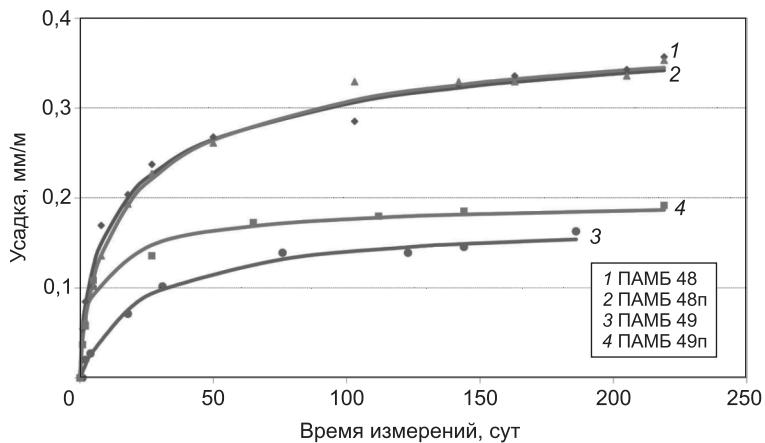


Рис. 3. Усадка порошково-активированных мелкозернистых бетонов без микрокремнезема

Графики деформации ПАМБ с микрокремнеземом представлены на рис. 2, без микрокремнезема на рис. 3. Точками на графиках обозначены экспериментальные значения усадки.

В итоге исследование показывает, что в порошково-активированных песчаных бетонах помимо прочности улучшаются и другие физико-технические характеристики. Общая закономерность улучшения характеристик бетона доказывается порошковой активацией бетонной смеси, рекомендуемой кафедрой ТБКиВ<sup>4</sup> при создании высокопрочных бетонов и бетонов общестроительного назначения. Все выделенные положительные качества в комплексе позволяют подобрать сферу применения, где бетон будет наиболее эффективен.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Калашников, В.И. Капиллярная усадка высокопрочных реакционно-порошковых бетонов и влияние масштабного фактора [Текст] / В.И. Калашников // Строительные материалы. — 2010. — № 5. — С. 52–53.
- Берг, О.Я. Об эффективности методов прогноза величин ползучести и усадки : Матер. совещ. НИИЖБ Госстроя СССР «Ползучесть и усадка бетона» [Текст] / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков. — М., 1969. — С. 136–145.
- Калашников, В.И. Высокопрочные порошково-активированные пропариваемые песчаные бетоны нового поколения [Текст] / В.И. Калашников, Д.М. Валиев, Е.В. Гуляева, В.М. Володин // Известия вузов. Строительство. — 2011. — № 5. — С. 14–19.
- Гупта, С.М. Усадка высокопрочного бетона [Текст] / С.М. Гупта, В.К. Сехгал, С.К. Каушик // Мировая научная академия проектирования и технологий. — Т. 50. — Пенанг, Малайзия, 2009. — С. 264–267.

**КАЛАШНИКОВ Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail:** techbeton@pguas.ru

**Пензенский государственный университет архитектуры и строительства**

**ВАЛИЕВ Дамир Маратович, асп.; E-mail: damir\_vm@mail.ru**

**Пензенский государственный университет архитектуры и строительства**

Получено 22.03.12

<sup>4</sup> Калашников В.И., Володин В.М., Валиев Д.М., Гуляева Е.В. Сухие тонкозернистые и порошковые бетонные смеси нового поколения // Научные основы современных технологий: опыт и перспективы. Хмельницкий; Гливица; Яремче, 2011. С. 488–495.

**Kalashnikov Vladimir Ivanovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: techbeton@pguas.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia  
**Valiev Damir Maratovich**, post-graduate student; E-mail: damir\_vm@mail.ru, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

## **DEFORMATION AND STRENGTH PROPERTIES OF THE POWDER ACTIVATED CONCRETES WITH SAND IN CONDITION ITS SOLIDIFICATION WITH PROCESSING OF THERMAL**

In this article were analyses the strength characteristics of powder activated concretes with sand and studying deformation from contraction. The made comparison deformation of powder activated concretes from contraction at normal condition its solidification and with processing of thermal.

**Key words:** shrinkage concrete, concrete with the lowered expense of cement, thermal treatment, activation by powders, specific expense of cement, silica fume.

### REFERENCES

1. Kalashnikov, V.I. Capillary shrinkage of high-strength reactive powder concrete and influence of a large-scale factor [Text] / V.I. Kalashnikov // Stroitel'nye materialy. — 2010. — N 5. — P. 52–53.
2. Berg, O.Ya. About Efficiency of Methods of a Forecast of Sizes of Creep and a Shrinkage: Meeting materials NIIZhB Gosstroja USSR «Creep and a Shrinkage Concrete» [Text] / O.Ya. Berg, E.N. Shcherbakov. — M., 1969. — P. 136–145.
3. Kalashnikov, V.I. Highstrength powder-activated sand concretes with curing procedures of a new generation [Text] / V.I. Kalashnikov, D.M. Valiev, E.V. Guljaeva, V.M. Volodin // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 5. — P. 14–19.
4. Gupta, S.M. Shrinkage of high strength concrete [Text] / S.M. Gupta, V.K. Sehgal, S.K. Kaushnik // World academy of science, engineering and technology. Vol. 50. — Penang, Malaysia, 2009. — P. 264–267.

УДК 691.31:678.06

В.С. ПОЛЯКОВ, В.А. ПАДОХИН

**ПЛАСТИФИЦИРУЮЩИЕ ДОБАВКИ  
ДЛЯ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСИИ  
ЛИГНОСУЛЬФОНАТОВ В СМЕСЯХ ОЛИГОМЕРОВ  
ε-КАПРОЛАКТАМА И ФОСФОЛИПИДОВ  
РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ**

Статья посвящена изучению свойств новых пластифицирующих добавок, предназначенных для регулирования сроков твердения тяжелых бетонных смесей; уменьшения их водопотребности без ухудшения удобоукладываемости (при одновременном повышении качества формования и увеличении прочности готовых изделий).

**Ключевые слова:** бетонные смеси, олигомеры  $\epsilon$ -капролактама, прочностные свойства, пластифицирующие добавки, лигносульфонаты, фосфолипиды, растительные масла, цементное тесто, время схватывания.

Технология строительных материалов постоянно совершенствуется, опираясь на последние достижения науки и, в частности, материаловедения. Одним из магистральных направлений развития современного строительного материаловедения является создание высокоэффективных методов улучшения структуры и свойств материалов и изделий с помощью добавок многофункционального назначения.

Известно [1], что от состава и качества используемых пластифицирующих добавок во многом зависят сроки начала и окончания схватывания бетонной смеси, текучесть, удобоукладываемость в форму, кинетика набора прочности и конечные прочностные свойства бетонов.

В отечественной строительной индустрии в качестве пластифицирующих добавок используются отходы масложировых, химических, нефтеперерабатывающих, целлюлозно-бумажных предприятий [2], например, подмыльный щелок производства растительных масел (ТУ 18РСФСР780). Установлено, что его использование увеличивает воздухововлечение, уменьшает влагопроницаемость и коррозию бетонов, повышает морозостойкость [3]. Для пластификации бетонных смесей применяют щелочной сток производства  $\epsilon$ -капролактама (ТУ 113003488) и щелочной сток модифицированный (ТУ 11303616) [2, 4].

Хорошими пластификаторами и замедлителями являются отходы целлюлозно-бумажного производства: лигносульфонаты технические (ТУ 13028103605) [1]. Однако применение отходов различных производств в качестве пластифицирующих, модифицирующих добавок в технологиях строительных материалов осложнено высокими транспортными расходами на их доставку потребителям, а также ограниченным сроком хранения.

В этой связи одним из наиболее перспективных направлений в области технологии создания пластификаторов, модификаторов бетонов является синтез концентрированных пластифицирующих композиций с улуч-

шенными свойствами на основе лигносульфонатов и безопасных для экологии продуктов олигомеризации капролактама.

Цель настоящей работы — разработка новых композиционных пластификаторов бетонов на основе дисперсий лигносульфонатов и продуктов олигомеризации  $\epsilon'$ -капролактама глицерином в среде рапсового и подсолнечного масел.

Олигомеры капролактама получали следующим образом. Первоначально осуществляли синтез олигомеров автоклавным методом при температуре 240–270 °C при избыточном давлении азота 0,15 кгс/см<sup>2</sup> в среде нерафинированного подсолнечного, рапсового масел. Гидрофильно-гидрофобные свойства олигомеров регулировали соотношением  $\epsilon'$ -капролактам / масло.

Ранее было установлено, что водные дисперсии продуктов олигомеризации  $\epsilon$ -капролактама в области концентраций 5,0–65,0 % (мас.) являются агрегативно и седиментационно устойчивыми в пределах от 10 до 240 ч. Это позволяет использовать их в качестве пластификаторов как в виде водной дисперсии, так и в виде безводного концентрата. Методом ИК-спектроскопии было также доказано, что структура молекул олигомеров  $\epsilon$ -капролактама включает гидрофильные амидные (-NHCO-), гидроксильные (-OH-), карбоксильные (-COOH) и гидрофобные метильные (-CH<sub>2</sub>), эфирные (-OCOOR) группы, наличие которых характеризует гидрофильно-гидрофобные свойства синтезированных олигомеров. Увеличение времени синтеза смещает гидрофильно-гидрофобный баланс полученных олигомеров в сторону гидрофобности, что объясняется увеличением средней молекулярной массы получаемых органических продуктов (олигомеров  $\epsilon'$ -капролактама)<sup>1</sup> [3].

Гидрофильно-гидрофобные свойства олигомеров капролактама характеризовали по величине углов смачивания в соответствии с ГОСТ 7934.2–74. В ходе экспериментов было установлено, что 5 %-е водные эмульсии синтезированных олигомеров  $\epsilon$ -капролактама имеют угол смачивания в интервале 23,0–68,0°. Вещества с подобными свойствами являются замедлителями твердения бетонных смесей [1].

На основе смеси фосфолипидной эмульсии (ФЛЭ) ТУ 10040259–89 и олигомеров  $\epsilon$ -капролактама с молекулярной массой 2400–2800 получили пластифицирующие композиции следующего состава:

- 1 — ФЛЭ + олиг. КЛ (1:1);
  - 2 — ФЛЭ + олиг. КЛ + ЛСТ (1:0,6:0,4);
  - 3 — ФЛЭ + олиг. КЛ + ЛСТ + ТПФ (1:0,6:0,4:0,05);
  - 4 — ФЛЭ + олиг. КЛ + ЛСТ + декстрин (1:0,6:0,4:0,05);
- ЛСТ — лигносульфонаты технические (натриевые соли) — ТУ 13-0281036-05; декстрин картофельный — ГОСТ 6034-74; ТПФ — триполифосфат натрия — ГОСТ 13493-86.

Для приготовления бетонной смеси использовали цемент марки ЦЕМ I 42,5Н ГОСТ 31108–2003.

В соответствии с ГОСТ 30459–2008 для определения эффективности экспериментальных добавок в испытательной лаборатории ОАО «Ивановская ДСК» г. Иваново готовили бетонную смесь тяжелого бетона класса по прочности В22,5. В соответствии с ГОСТ 18105–86, ГОСТ 27006–86 и СНиП 82-02-95 «Федеральные элементные нормы расхода цемента при изготовлении бетонных и железобетонных изделий и

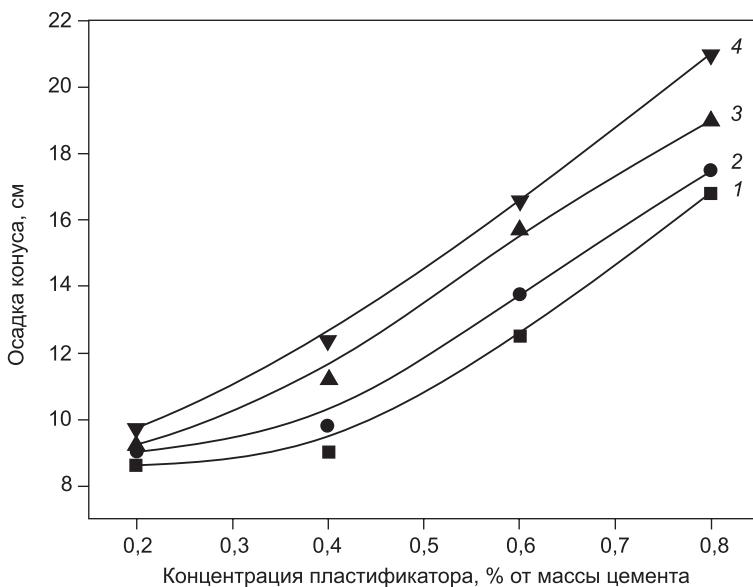
<sup>1</sup> Поляков В.С., Падохин В.А. Добавки на основе олигомеров  $\epsilon'$ -капролактама для тяжелых бетонов [Тезисы] // Матер. Междунар. науч.-техн. конф. по хим. технологиям. М., 18–23 марта 2012 г.

конструкций» и по результатам лабораторных и производственных испытаний был подобран контрольный состав бетонной смеси в расчете на 1 м<sup>3</sup>. путем пересчета расхода материалов, необходимых для получения трех образцов бетона размером 100 × 100 × 100 мм получили следующий состав сухой бетонной смеси: цемент — 1050 г; песок — 2460 г; щебень — 3360 г.

Для приготовления бетонной смеси использовали цемент марки ЦЕМ I 42,5Н ГОСТ 31108–2003 (ОАО «Мордовцемент»), песок с модулем крупности ( $M_{kp}$ ) 2,0–2,5 и щебень фракции 5,0–20,0 мм при водоцементном отношении — 0,30. В ходе испытаний определяли время начала и окончания схватывания цементной пасты, осадку конуса бетонной смеси.

С целью определения прочности на сжатие изготавливали кубы 100 × 100 × 100 мм (4 серии по 6 шт.) для каждого образца бетона с добавками и образца без добавок (эталона). Для испытаний использовали пресс П-125 со шкалой 62,5 (тс) и таблицу пересчета нагрузки сжатия при поправочном коэффициенте  $K = 0,95$ , учитывающем размер грани куба испытуемого образца (100 мм), так как стандартными являются кубы с размером грани 150 мм (ГОСТ 10180–90, ГОСТ 18105–86).

Изменение величины удобоукладываемости (измерение осуществляли по осадке конуса в соответствии с ГОСТ 10181–2000) бетонной смеси от состава и количества пластификатора (мас. % к массе цемента) показано на рис. 1. Осадка конуса контрольного состава бетонной смеси составила 3,8 см.



Зависимость осадки бетонной смеси от концентрации пластифицирующих добавок № 1–4

Для оценки пластифицирующих свойств экспериментальных добавок 1–4 определяли осадку конуса бетонной смеси при концентрации добавок 0,2 и 0,8 % (от массы цемента).

Количество вводимых добавок (0,2, 0,8 % от массы цемента) обусловлено тем, что по результатам эксперимента требовалось сравнить действие экспериментальных добавок с применяемыми на базовом предприятии добавок «Бэст» (производитель — ООО «Макра», г. Новочебоксарск), С-3 (производитель — ООО «ТД Суперпласт», г. Владимир). По

условиям технологии изготовления сборного железобетона класса В22,5 применяемые добавки должны обеспечивать подвижность смеси, соответствующей марке П2, что соответствует осадке конуса 8–9 см (ГОСТ 7473–94). Кроме того, применение добавок должно обеспечить достижение требуемых прочных показателей бетона на 28-е сутки твердения.

Нормируемый показатель по прочности на сжатие образцов кубов бетона В22,5 по ГОСТ 26633–91 составляет 294,7 кгс/см<sup>2</sup> (30 МПа).

Осадка конуса бетонной смеси с добавками № 1–4 (см. рисунок) при их концентрации в смеси 0,2 % составила (см): 8,6 (1), 9,0 (2), 9,2 (3), 9,7 (4).

Увеличение прочности на сжатие образцов бетона с добавками по сравнению с прочностью эталонного образца на 28-е сутки при В/Ц = 0,3 показано в табл. 3. Среднее квадратическое отклонение прочности бетона в сериях образцов составило: 2,64 (эталон), 2,53 (1), 2,76 (2), 2,68 (3), 2,61 (4).

Коэффициенты вариации полученных данных прочности бетона в сериях образцов составили: 0,84 % (эталон), 0,73 % (1), 0,78 % (2), 0,79 % (3), 0,72 % (4).

При концентрации добавок № 1–4 0,8 % осадка конуса бетонной смеси изменялась следующим образом (см): 16,8 (1), 17,5 (2), 19,0 (3), 21,0 (4). Это свидетельствует о том, что добавки № 1–3 обеспечивают подвижность смеси от марки П1 до марки П4, а добавка № 4 до марки П5.

Эти данные позволяют характеризовать исследуемые добавки в соответствии с ГОСТ 24211–91 (п.3.1) как пластифицирующие I (4) и II (1, 2, 3) группы; они могут быть сравнимы с суперпластификаторами и разжижителями бетонных смесей.

Сроки начала и окончания схватывания цементной пасты определяли по ГОСТ 310.3–74.

В табл. 1 приведены экспериментальные данные о влиянии концентрации добавок на сроки схватывания цементной пасты.

Таблица 1  
Сроки твердения цементной пасты (ч:мин)

№ п/п	Пластифи- цирующая добавка	Количество добавки (% к массе цемента)							
		0,1		0,4		0,8		2,0	
		начало	окончание	начало	окончание	начало	окончание	начало	окончание
1	№ 1	3:20	5:35	3:50	5:05	4:10	5:40	4:40	6:15
2	№ 2	3:40	5:45	4:05	5:30	4:45	6:05	5:05	6:50
3	№ 3	3:55	5:55	4:15	5:55	4:50	6:45	5:30	7:10
4	№ 4	3:45	5:50	4:20	6:10	4:55	7:05	5:40	7:20

Начало схватывания образца без добавки — 2 ч 55 мин, окончание — 4 ч 10 мин.

Полученные данные о влиянии пластифицирующих добавок № 1–4 на сроки схватывания цементной пасты свидетельствуют о том, что эти добавки могут быть использованы для замедления твердения, повышения подвижности и улучшения удобоукладываемости бетонных смесей.

В табл. 2 приведены результаты изучения эффективности новых пластифицирующих добавок (при концентрации 0,2 %) в соответствии с ГОСТ 24211–91, ГОСТ 30459–2008.

Из данных, приведенных в табл. 2, видно, что добавки № 1, 4 являются не только пластифицирующими и замедляющими твердение бетона, но

Таблица 2

**Эффективность экспериментальных пластифицирующих добавок**

№ п/п	Наименование добавки	Плотность бетонной смеси (кг/м <sup>3</sup> )	Прочность бетона при сжатии, твердеющего в нормальных условиях $R_{сж}$ (кгс/см <sup>2</sup> )				Плотность бетона при сжатии на 28-е сутки (кг/м <sup>3</sup> )
			1 сут	3 сут	7 сут	28 сут	
1	Эталон без добавки	2405	48	98	210	315	2414
2	№ 1	2386	34	84	198	348	2402
3	№ 2	2401	41	80	202	356	2419
4	№ 3	2390	30	76	212	362	2428
5	№ 4	2374	35	72	185	340	2406

и воздухововлекающими. Об этом свидетельствует снижение плотности бетона на 28-е сутки на 0,5 % (1), 0,34 % (4) по сравнению с образцом без добавки.

В работах [1, 3] показано, что лигносульфонаты, карбоновые кислоты и их эфиры, сахара и их производные, фосфаты действуют как замедлители твердения и понижают водопотребность бетонной смеси. Для исследования водоредуцирующих свойств добавок № 1–4 в ходе эксперимента уменьшили водоцементное отношение в бетонной смеси с 0,30 до 0,27 без изменения количества вводимых пластифицирующих добавок (0,2 % от массы цемента). Далее определяли эффективность пластифицирующих свойств экспериментальных добавок № 1–4 и применяемых на базовом предприятии (ОАО «Ивановская ДСК» г. Иваново) добавок С-3 и «Бэст».

Влияние добавок в зависимости от концентрации и водоцементного отношения для бетонной смеси показано в табл. 3.

Таблица 3

**Сравнение эффективности действия экспериментальных и применяемых добавок на свойства тяжёлых бетонов**

№ п/п	Образцы	Концентрация добавки, %		Осадка конуса, см		Прочность бетона при сжатии на 28-е сутки в условиях нормального твердения			
						В/Ц = 0,3		В/Ц = 0,27	
		В/Ц = 0,3	В/Ц = 0,27	В/Ц = 0,3	В/Ц = 0,27	кгс/см <sup>2</sup>	%	кгс/см <sup>2</sup>	%
1	Без добавки	—	—	3,8	2,7	315	100	325	100
2	Добавка № 1	0,2	0,2	8,6	8,1	348	110,5	353	108,6
3	Добавка № 2	0,2	0,2	9,0	8,4	356	113,0	361	111,1
4	Добавка № 3	0,2	0,2	9,2	8,8	351	111,4	359	114,5
5	Добавка № 4	0,2	0,2	9,7	9,2	362	114,9	372	110,5
6	Добавка «Бэст»	0,34	0,45	8,3	8,0	326	103,5	347	106,5
7	Добавка С-3	0,3	0,4	8,6	8,3	338	107,3	349	107,4

Данные по осадке конуса бетонной смеси с добавками при В/Ц = 0,27 приведены в табл. 3, из которой видно, что наибольшая осадка конуса смеси наблюдается с добавками № 3, 4. Измеренная осадка конуса контрольного образца смеси — 2,7 см.

Полученные в ходе исследований данные показывают, что добавки № 1–4 обеспечивают удобоукладываемость бетонной смеси, соответст-

вующую марке П2 (ГОСТ 10181–2000) при увеличении прочности на сжатие образцов на 28-е сутки от 8,6 % (1) до 14,5 (3).

Для каждого образца бетона с добавками № 1–4 ( $B/C = 0,27$ ) были изготовлены по шесть кубов  $100 \times 100 \times 100$  мм для определения прочности на сжатие на 28-е сутки.

Увеличение прочности на сжатие образцов бетона с добавками по сравнению с прочностью эталонного образца на 28-е сутки при  $B/C = 0,27$  показано в табл. 3.

Среднее квадратическое отклонение прочности бетона в сериях образцов при этом составило: 2,46 (эталон), 0,69 % (1), 0,66 % (2), 0,71 % (3), 0,67 % (4).

Коэффициенты вариации полученных данных прочности бетона в сериях образцов составили: 0,75 % (эталон), 0,69 % (1), 0,66 % (2), 0,71 % (3), 0,67 % (4).

В ходе исследований сравнивали эффективность используемых на заводах ЖБК отечественных добавок «Бэст», С-3 и экспериментальных добавок № 1–4. Добавки брали в количестве 0,2 % от массы цемента (в пересчете на сухое вещество).

Результаты испытаний добавок «Бэст» и С-3 показаны в табл. 3, из которой видно, что для обеспечения подвижности смеси, соответствующей марке П2, требуется увеличение дозировки добавок «Бэст» и С-3. Экспериментом установлено, что для исследуемой смеси при  $B/C = 0,3$  количество добавки «Бэст» должно быть не менее 0,34 %, а добавки С-3 не менее 0,30 %, что соответствует измеренной осадке конуса соответственно 8,3 и 8,6 см. При  $B/C = 0,27$  необходимая дозировка составляет 0,45 % («Бэст») и 0,4 % (С-3). Осадка конуса смеси составила 8,0 и 8,3 см соответственно.

**Выводы.** 1. Разработанные добавки № 1–4 являются эффективными замедлителями твердения тяжелых бетонных смесей.

2. Для повышения пластичности бетонной смеси до уровня, соответствующего марке по удобоукладываемости П2, добавок № 1–4 требуется в 1,4–1,7 раза меньше, чем добавок «Бэст» и С-3.

3. Добавки № 1–4 — водоредуцирующие III группы (ГОСТ 24211–91 п.3.1).

4. Добавки № 1–3 в концентрации 0,8 % (от массы цемента) обеспечивают подвижность бетонной смеси от марки П1 до марки П4, а добавка № 4 до марки П5 и по эффективности пластифицирующего действия могут быть сравнимы с известными добавками С-3, «Дофен», МТС-1 и др.

Расчетная отпускная цена добавок № 1–4 при 10 % рентабельности на сегодняшний день составляет 64–68 руб./кг и она сопоставима с ценами аналогичных по действию отечественных и зарубежных добавок. Меньший расход экспериментальных добавок для пластифицирования тяжелых бетонных смесей по сравнению с аналогичными добавками обеспечивает их конкурентоспособность по показателям качества и по цене.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рамачандран, В. Наука о бетоне : Физико-химическое бетоноведение [Текст] / В. Рамачандран, Р. Фельдман, Дж. Бодуэн ; пер. с англ. Т.И. Розенберг, Ю.Б. Ратиновой ; под ред. В.Б. Ратинова. — М. : Стройиздат, 1986. — 278 с.
2. Рекомендации по применению химических добавок в бетоне. — М. : Стройиздат, 1977. — 80 с.

3. Ратинов, В.Б. Химия в строительстве [Текст] / В.Б. Ратинов, Ф.М. Иванов. — М. : Стройиздат, 1977. — 380 с.
4. Рабек, Я. Экспериментальные методы в химии полимеров. Ч. I. [Текст] / Я. Рабек. — М. : Мир, 1983. — 384 с.

*ПОЛЯКОВ Вячеслав Сергеевич, зав. лабораторией «Полимер»; E-mail: polyakov.viacheslav@yandex.ru*

*Ивановский государственный химико-технологический университет*

*ПАДОХИН Валерий Алексеевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: vap@isc-ras.ru, зав.*

*лабораторией «Химия и технология нелинейных процессов»*

*Институт химии растворов РАН, г. Иваново*

Получено после доработки 21.03.12

**Polyakov Vyacheslav Sergeevich**, head of the laboratory «Polimer»; E-mail: polyakov.viacheslav@yandex.ru, Ivanovo State University of Chemistry and Technology, Russia

**Padohin Valeriy Alekseevich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: vap@isc-ras.ru, head of the laboratory «Chemistry and Technology of Non-linear Processes», Institute of Solution Chemistry Russian Academy Sciences, Ivanovo, Russia

## **PLASTIFYING ADDITIVES FOR CONCRETE MIXES ON THE BASIS OF DISPERSION OF LIGNOSULPHONATES IN MIXE OF OLIGOMERS $\epsilon$ -CAPROLACTAME AND PHOSPHOLIPIDES OF VEGETABLE OIL**

It was shown that blends of  $\epsilon$ -caprolactam oligomers and phospholipids of vegetable oils can be used as plasticizing agents for heavy concretes. Properties of these plasticizing blends and the best known fluidifiers are equivalent.

**Key words:** concrete mixes, oligomers  $\epsilon$ -caprolactame, stronging properties, plastifying additives, lignosulphonates, phospholipides, vegetables oils, cemented dough, time of grasping.

### **REFERENCES**

1. Ramachandrag, V. Science About Concrete. Phisical-Chemical is a Concrete Knowledge [Text] / V. Ramachandrag, R. Feldman, Dg. Boduen ; Transl. with English T.I. Rozenberg, Yu.B. Ratinov ; editor is a V.B. Ratinov. — M. : Stroyizdat, 1986. — 278 p.
2. Recommendation on to Using of Chemicals Additives in the Concrete. — M. : Stroyizdat, 1977. — 80 p.
3. Ratinov, V.B. Chemistry in the Construction [Text] / V.B. Ratinov, F.M. Ivanov. — M. : Stroyizdat, 1977. — 380 p.
4. Rabek, Ya. Experiments Methods in the Chemistry of Polymers. Part I [Text] / Ya. Rabek. — M. : Peace, 1983. — 384 p.

УДК 691.31:678.06

П.И. ЮХНЕВСКИЙ

## КРИТЕРИАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ДОБАВОК-ПЛАСТИФИКАТОРОВ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗА ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Приведена блок-схема для прогнозирования активности добавок-пластификаторов в зависимости от химического строения и структуры молекулы. Предлагается группа критериев и их численные характеристики для оценки эффективности добавок-пластификаторов на стадии разработки: энергия образования комплексов,  $\Delta H_f$ , кДж / моль; дипольный момент молекулы,  $D$ ; концентрационная активность добавки.

Ключевые слова: добавки-пластификаторы, электронная структура, численные характеристики.

Известно, что существенные достижения последних десятилетий в технологии бетона обусловлены значительным увеличением объемов и эффективности применения добавок различной природы. При этом прогресс в «химизации» технологии бетона в значительной степени связан с использованием в качестве основного компонента добавок высокоеффективных ПАВ пластифицирующего и водореудицирующего действия.

Классификация добавок в бетон предопределяется различными подходами и признаками. Физико-химический подход, основанный на знаниях о механизмах действия добавок на элементарные стадии гидратации — смачивание, адсорбцию, зародышеобразование, химические реакции, а также учитывающий структуру молекулы добавки, является важным и интересным, но не получил должного развития в связи с методологическими сложностями их выделения и количественного описания<sup>1, 2</sup>. Такой подход, основанный на взаимосвязи строения и свойств химических добавок с их влиянием на технологические свойства бетонных смесей и строительно-технические свойства бетонов, был реализован проф. В.Г. Батраковым при исследовании кремнийорганических соединений и разработке модификаторов многоцелевого назначения<sup>3</sup> и проф. В.И. Калашниковым в исследованиях конформационного состояния молекул пластификаторов и его влияния на адсорбционную и пластифицирующую способность ряда алифатических, карбо- и гетероциклических соединений<sup>4</sup>.

В Республике Беларусь эффективность добавок-пластификаторов определяется СТБ 1112–98 «Добавки для бетонов. Общие технические условия», где по основному эффекту действия выделено четыре группы добавок-пластификаторов. В стандарте регламентированы технические

<sup>1</sup> Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. М.: Стройиздат, 1989. 188 с.

<sup>2</sup> Uchikawa H., Hanehara S., Sawaki D., The Role of Repulsive Force in the Dispersion of Cement Particles in fresh Paste prepared with Organic Admixtures, Cement and Concrete Research. 1997. Vol. 27. P. 37–50.

<sup>3</sup> Батраков В.Г. Модификаторы бетона: новые возможности и перспективы // Строительные материалы. 2006. № 10. С. 4–7.

<sup>4</sup> Калашников В.И. Основы пластифицирования минеральных дисперсных систем для производства строительных материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05. Воронеж, 1996. 89 с.

требования к каждой группе добавок, гармонизированные с требованиями европейских стандартов DIN EN 934-2, 934-3, 934-5, 480-6. Способы определения эффективности добавок определены в межгосударственном стандарте ГОСТ 30459–2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Методы определения эффективности».

Обилие на отечественном рынке разновидностей добавок-пластификаторов и комплексных на их основе затрудняет работу практиков. Методика оценки эффективности добавок, регламентированная ГОСТ 30459–2008, не охватывает всех параметров, поэтому рядом ученых предлагаются альтернативные методики для расчета критериев эффективности добавок.

В последние годы в Ростовском государственном строительном университете (РГСУ)<sup>5</sup> и в Пензенском государственном университете архитектуры и строительства (ПГУАС)<sup>6</sup> разработаны методики и критерии оценки эффективности добавок-суперпластификаторов (СП) в бетоне.

Разработанная в ПГУАС методика классификационной оценки цементов предусматривает сравнение суточной прочности равнопластичных мелкозернистых смесей состава 1:2, изготовленных с суперпластификаторами и без них. При этом цементы I класса должны обеспечить через одни сутки прочность мелкозернистого бетона не менее контрольной, II класса — от 50 до 100 % от контрольной и III класса — до 50 %.

Дополнительно предлагается определять показатели:

— торможения  $K_t$  и ускорения  $K_y$  набора суточной прочности цемента, раствора или бетона с суперпластификатором по сравнению с контрольным составом в равнопластичных смесях;

— концентрационно-водоредуцирующую чувствительность цементов к СП, определяемую по выражению

$$K_{\alpha} = \frac{\Delta B_d}{C_n}, \quad (1)$$

где  $\Delta B_d$  — водоредуцирующее действие, в % относительно контрольного состава;

$C_n$  — дозировка СП в % от массы цемента;

— эффективный коэффициент набора суточной прочности цементного камня, раствора, бетона с СП с учетом водоредуцирования

$$K_s = K_c \cdot B_d, \quad (2)$$

где  $B_d = \frac{(B/\bar{U})_n}{(B/\bar{U})_p}$ , а  $(B/\bar{U})_n$  и  $(B/\bar{U})_p$  — соответственно водоцементное отношение непластифицированных и пластифицированных цементных композиций.

Похожие критерии эффективности добавок-пластификаторов для стадии применения разработаны в РГСУ: снижение водопотребности  $\Delta B_{min}$ , повышение прочности  $z_{min}$ , влияние на гидратационную активность цемента  $K_{min}$ , повышение прочности для равноподвижных смесей  $C_{min}$  и влияние на деформации усадки  $S$ . Все критерии имеют физический смысл, приведены численные характеристики для различных добавок, а методики легко воспроизводимы.

<sup>5</sup> Несветаев Г.В. Эффективность применения суперпластификаторов в бетонах // Строительные материалы. 2006. № 10. С. 23–25.

<sup>6</sup> Демьянова В.С. Методологические и технологические основы производства высокопрочных бетонов с высокой ранней прочностью для беспрогревных и малопрогревных технологий: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05. Пенза, 2002. 472 с.

В работе<sup>7</sup> в качестве основного критерия принято изменение степени гидратации вяжущего  $k_\alpha$  во времени. Дополнительными критериями служат продолжительность индукционного периода  $k$  и скорость взаимодействия  $k_\phi$ . В качестве количественного показателя предложен индекс эффективности добавки  $E_{a/c}$ , определяемый по формулам с применением трех вышеуказанных критериев в зависимости от схемы влияния добавки-пластификатора.

Такой подход позволяет несколько приблизиться к пониманию сути действия добавок и к прогнозу их эффективности. Поскольку характер и эффективность модификации цементных композиций химическими добавками определяется видом строения последних, то правильнее вести речь о проектировании модификаторов на стадии их создания. Установленные закономерности изменения свойств цементных композиций от строения химических веществ лежат в основе модификации бетонных смесей и получения бетонов с заданными строительно-техническими свойствами.

В настоящей статье мы попытаемся обосновать критерии оценки эффективности добавок-пластификаторов на стадии их создания и связанные непосредственно со структурой и свойствами действующего вещества добавки.

Ранее проведенными исследованиями [1, 2] нами определены дипольные моменты молекул добавок-суперпластификаторов Мельмент L-10, С-3, Стакемент 2000, Стакемент F — экспериментальным методом, а для ряда олигомеров на основе нитросоединений (продукты обработки смолы ДЭГ-1, эпихлоргидрина, нитрометана, этиленоксида и др.) дипольные моменты молекул рассчитаны квантово-химическим методом. Установлена корреляционная связь водоредуцирующей эффективности добавок для среднеалюминиатного цемента с величиной дипольного момента молекулы.

Поскольку эффективность пластификаторов определяется природой активных групп, квантово-химическими расчетами [3] определены энергии образования комплексов с  $C_3S$  и величины ионизационных потенциалов для различных функциональных групп добавок-пластификаторов: спиртовых, фенольных и ароматических аминогрупп — добавки УПБ, ЛСТ; фенолят-анионов — сульфонаты фенолформальдегидной смолы; алкиларилсульфонатов — добавка М-1; алкилнафталинсульфонатов — добавки С-3, СМФ; нитроэфиров и щелочных солей нитроновой кислоты — продукт обработки смолы ДЭГ-1; нитроната эпихлоргидрина; алкилмеламинсульфонатов — добавки 10-03, 30-03; карбоксилатов щелочных металлов — добавки ПАЩ, КОЩ; арилкарбоксилатов — добавка ВРП-1.

По результатам исследований различных добавок-пластификаторов известной молекулярной структуры (продуктов обработки нитросоединений, продуктов обработки замещенных бензолов, хинонов и фенолов, продуктов окисления, карбоксилирования и сульфирования фенолформальдегидных смол) разработана блок-схема (рис. 1) методологического подхода к прогнозированию активности пластифицирующих добавок и предложена система (см. таблицу) критериальной оценки эффективности добавок пластификаторов по следующим показателям:

- энергия образования комплексов,  $\Delta H_f$ , кДж / моль;
- дипольный момент молекулы,  $D$ ;
- концентрационная активность добавки, определяемая по формуле

<sup>7</sup> Ушеров-Маршак А.В. Добавки в бетон: прогресс и проблемы // Строительные материалы. 2006. № 10. С. 8–12.

$$K_a = \frac{\Delta \Pi_{\min}}{D_{\min}} - \frac{\Delta \Pi_{\max}}{D_{\max}}, \quad (3)$$

где  $\Delta \Pi_{\min}$  и  $\Delta \Pi_{\max}$  — соответственно увеличение подвижности смеси (см) от исходной при минимальном  $D_{\min}$  и максимальном  $D_{\max}$  количестве добавки (%). Концентрационная активность добавки характеризуется тангенсом угла наклона кривой изменения подвижности смеси с увеличением количества добавки.

Как видно из таблицы, добавки III, IV группы или слабопластифицирующие обладают энергией образования комплексов и дипольным момен-

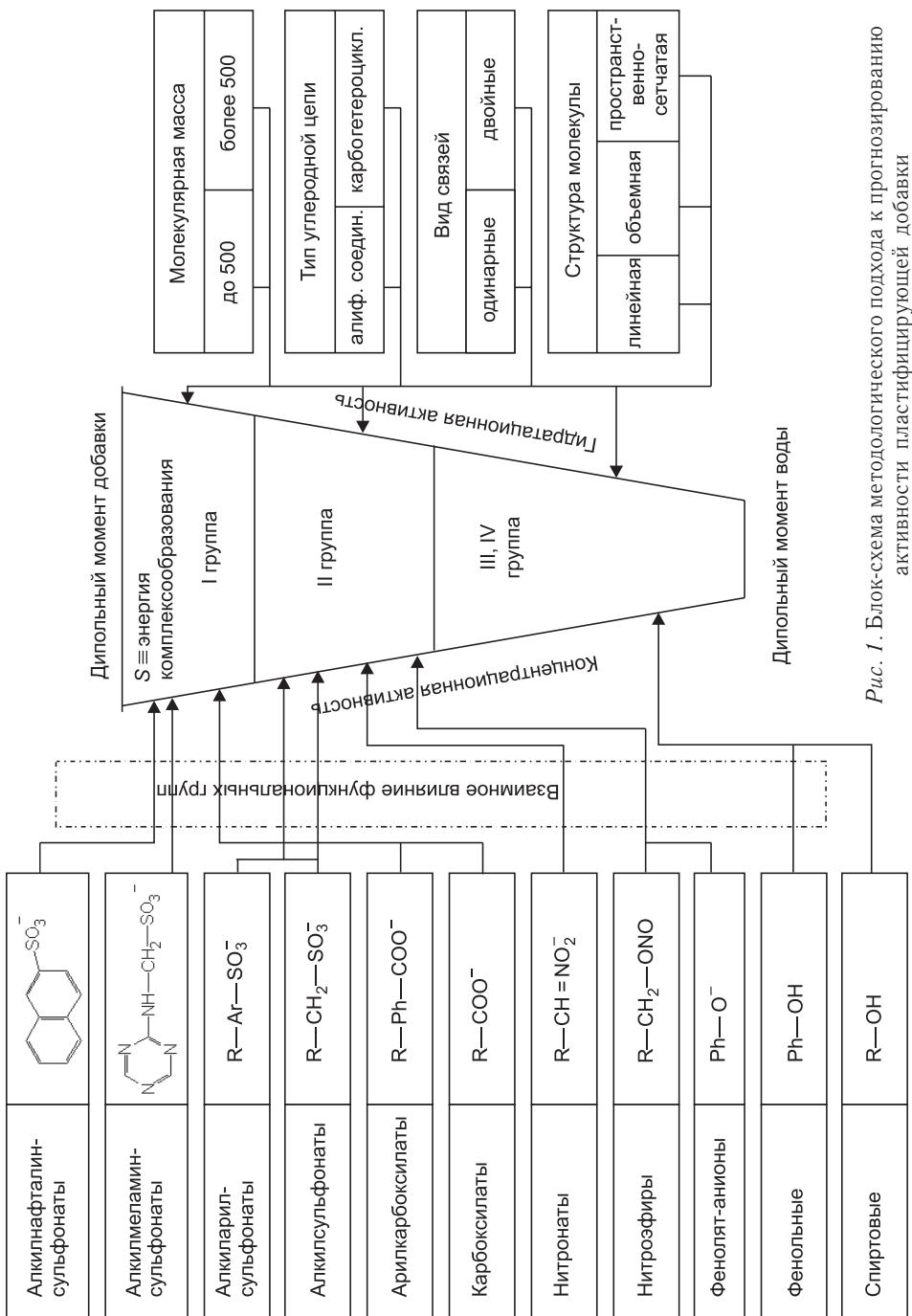


Рис. 1. Блок-схема методологического подхода к прогнозированию активности пластифицирующей добавки

### Критерии оценки эффективности добавок-пластификаторов

Группа эффективности		Критерии оценки		
По СТБ 1112-98	По ГОСТ 24211–2008	Энергия образования комплекса, $\Delta H_f$ , кДж / моль	Дипольный момент молекулы, $D$	Концентрационная активность
I	Суперпластифицирующие	Более 400	Более 4	Не более 15
II		200–350	2,5–4	15–30
III, IV	Пластифицирующие	Менее 100	Менее 2,2	Более 30

том, сравнимыми с молекулами воды, и характеризуются наибольшим значением концентрационной активности. Например, суперпластификатор С-3 характеризуется энергией образования комплекса с  $C_3S$   $\Delta H_f = 414,86$  кДж / моль; ионизационный потенциал молекулы  $U = 8,9$  эВ и дипольный момент молекулы  $\mu = 9,74 D$ . Добавка ЛСТ, как известно, содержит спиртовые группы  $\Delta H_f = 54,18$  кДж / моль,  $U = 10,5$  эВ, фенольные  $\Delta H_f = 50,19$  кДж / моль,  $U = 9,1$  эВ и алкилсульфонаты  $\Delta H_f = 416,2$  кДж / моль,  $U = 9,9$  эВ [2, 3]. Понятно, что в этом случае прогноз эффективности по критериям усложняется взаимным влиянием различных активных групп.

Пластифицирующая способность химических добавок определяется многими факторами. В первую очередь, пластифицирующий эффект при введении в минеральные вяжущие органических соединений нужно ожидать при наличии в молекуле химического продукта большого углеводородного радикала и активных функциональных групп, способных реагировать с минералами вяжущего или продуктами его гидратации. При этом вид и количество электронно-оттягивающих групп определяют величину дипольного момента молекулы и, соответственно, долю электростатической составляющей механизма пластификации. Дипольный момент и энергия образования комплексов с продуктами гидратации цементных минералов определяют концентрационную активность добавки. На пластифицирующую способность также влияет молекулярная масса вещества, учитываемая при определении дипольного момента молекулы. Кроме того, взаимным влиянием функциональных групп определяется величина мезомерного эффекта и степень выравнивания зарядов вследствие делокализации и растекания электронов по анионно-активной группе или в целом по молекуле вещества. Последнее в наибольшей степени характерно для окисленных фенолов, что приводит к многоанкерному закреплению, усилинию пластификации и снижению гидратационной активности вяжущего.

Конформация молекулы, зависящая от типа углеродной цепи, вида связей, структуры молекулы, помимо влияния на пластифицирующую способность, в большей степени определяет гидратационную активность цемента в присутствии добавки. Соответственно влияние добавок на протекание реакций гидратации определяется особенностями строения органоминеральной адсорбционной пленки, обусловленными различным пространственным расположением макромолекул в адсорбционной пленке, видом и положением функциональных групп и различиями в энергии связи их с гидратированными частицами цемента.

Многоанкерное закрепление молекул добавки на поверхности твердой фазы повышает ее пластифицирующую способность, так как приводит к перекрытию и менее активных центров, способных адсорбировать воду. В то же время пластифицирующее действие линейно-аннелированных много-

ядерных продуктов существенно ниже, чем ангулярно-аннелированных (угловых) или соединений с пространственной структурой, вследствие проявления стерической составляющей пластифицирующего эффекта.

Возможность поворота молекулярных групп вокруг простых связей изменяет конформацию молекулы и приводит к локализации большего числа активных центров на поверхности гидратов цемента и тем самым уменьшает его гидратационную активность.

Как видно из блок-схемы (см. рис. 1), большинство показателей количественно учтено в таблице, кроме гидратационной активности. Физический смысл показателя — во сколько раз изменяется прочность камня, изготовленного из смеси с СП при неизменной относительно эталонного состава величине В/Ц. Показатель может определяться как в проектном, так и в раннем возрасте, в этом случае выявляется влияние СП на процессы гидратации в ранние сроки твердения, а также для бетона.

В свою очередь, влияние добавки на скорость гидратации цемента зависит от прочности образуемых ею химических связей в процессе адсорбции и может быть связано с потенциалом ионизации. Потенциалом ионизации атома называется минимальная энергия, которую необходимо сообщить нейтральному атому или иону для удаления электрона со стационарной орбиты в бесконечность, измеряемая обычно в электрон-вольтах методом электронного удара. Особенность ионизации жидких растворов добавок в том, что в них молекулы растворенного вещества распадаются на ионы уже в самом процессе растворения без всякого внешнего ионизатора за счет взаимодействия с молекулами растворителя.

Величину ионизационного потенциала молекулы для различных добавок-пластификаторов мы получили ранее [3] расчетами с помощью программы МОРАС-2009, а связь его с концентрационной активностью добавки-пластификатора приведена на рис. 2.

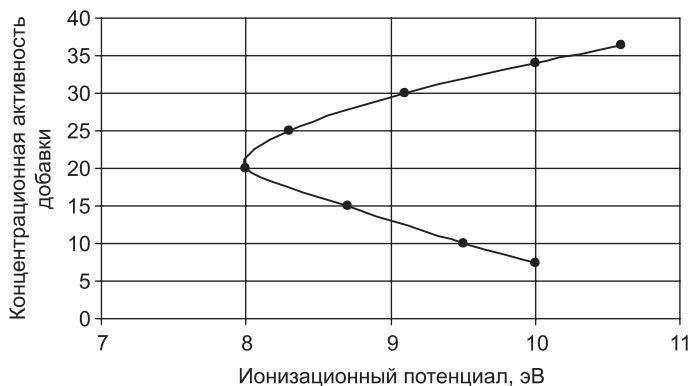


Рис. 2. Зависимость концентрационной активности добавки-пластификатора от значения ионизационного потенциала молекулы: неисходящая ветвь — ионизированные группы, восходящая — неионизированные

График аппроксимируется выражением

$$Y = a + b \cdot x^m + c \cdot x^3, \quad (4)$$

где  $x$  — ионизационный потенциал, эВ;

$m$  — вид добавки ( $m = 3$  — ионизированные вещества,  $m = 5$  — неионизированные);

$a = 31,57$ ;  $b = 0,00026$ ;  $c = -0,025$ ;  $\Delta_{\max} = 1,56$ .

Рассчитав теоретически ионизационный потенциал, можно определить концентрационную активность добавки.

Гидратационную активность цемента в присутствии пластификатора можно представить как функцию следующих переменных:

$$K_t = f(P_{op}, M, U, \eta, K_u), \quad (5)$$

где  $P_{op}$  — ориентационная поляризация молекулы;

$M$  — молекулярная масса (звена цепи);

$U$  — ионизационный потенциал добавки;

$\eta$  — приведенная вязкость водного раствора добавки;

$K_u$  — коэффициент, определяющий свойства цемента.

Эти показатели определяют способность пластификатора определенным образом адсорбироваться на поверхности гидратов цемента, а также прочность комплексных соединений и в конечном итоге скорость гидратации цемента. Если учесть, что ориентационная поляризация молекулы добавки в растворе определяется по формуле

$$\frac{N_A}{3\epsilon_0} \cdot \frac{\mu_1^2 \cdot x_1 + \mu_2^2 \cdot x_2}{3kT} = P_{p-pa}^{op}, \text{ м}^3/\text{моль} \quad (6)$$

( $N_A$  — число Авогадро;  $k$  — постоянная Больцмана;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная;  $T$  — абсолютная температура;  $\mu_1, x_1$  и  $\mu_2, x_2$  — соответственно дипольные моменты и молярные доли растворенного вещества добавки и растворителя (воды)), а ионизационный потенциал молекулы может быть рассчитан теоретически, то наибольшую проблему представляет учет влияния цемента.

Для нафталинформальдегидного суперпластификатора С-3 зависимость водоредуцирующей эффективности от расхода цемента (для среднеалюминатного, Ц, кг/м<sup>3</sup>), количества добавки (Д, %) и дипольного момента молекулы ( $\mu$ ,  $D$ ) выглядит следующим образом:

$$\Delta W = (0,0028 \cdot \mu^{0,9057} + 0,029 \cdot D) \cdot \text{Ц}^{0,28}. \quad (7)$$

Для других добавок пластификаторов уравнение имеет тот же вид, изменяются лишь коэффициенты при переменных. Это обусловлено тем, что с изменением структуры молекулы добавки (вида и количества функциональных групп в молекуле, ее молекулярной массы, наличия привитых боковых цепей), кроме электростатической составляющей, изменяется и доля стерической составляющей пластифицирующего эффекта, учесть влияние которой пока не представляется возможным.

Таким образом, при известной электронной структуре молекулы добавки приближенно ее эффективность оценивают, пользуясь блок-схемой (см. рис. 1). Для количественной оценки эффективности квантово-химическими расчетами определяют энергию образования комплекса с гидратированным C<sub>3</sub>S, величину дипольного момента и ионизационный потенциал молекулы. Последнюю можно определить экспериментально по методике [3]. Концентрационную активность добавки рассчитывают по формуле (4).

Предложены научно-методологический подход и критериальная оценка эффективности добавок-пластификаторов на стадии их создания, что повышает эффективность эксперимента по конструированию и синтезу новых целевых соединений, сокращает время и расходы на экспериментальные исследования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юхневский, П.И. О корреляционной связи водоредуцирующей эффективности с величиной дипольного момента химической добавки-пластификатора [Текст] / П.И. Юхневский, В.М. Зеленковский, В.С. Солдатов // Технологии бетонов. — 2010. — № 9–10. — С. 28–29.
2. Юхневский, П.И. Определение дипольных моментов добавок-пластификаторов для цементных бетонов [Текст] / П.И. Юхневский // Вестник БНТУ. — 2010. — № 2. — С. 11–14.
3. Юхневский, П.И. Об определяющей роли функциональных групп и вида связей в структуре молекулы химической добавки-пластификатора [Текст] / П.И. Юхневский // Строительная наука и техника. — 2011. — № 4. — С. 25–27.

*ЮХНЕВСКИЙ Павел Иванович, канд. хим. наук, доц.; E-mail: sawa1950@mail.ru  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь*

Получено после доработки 23.03.12

**Yuhnevsky Pavel Ivanovich**, candidate of chemical sciences, assistant professor;  
E-mail: sawa1950@mail.ru, Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

### EVALUATION CRITERION-PLASTICIZER ADDITIVES CONCRETE MIXES FOR PREDICTION OF PERFORMANCE

Shows a block diagram to predict the activity of plasticizer additives, depending on the chemical structure and molecular structure. Proposed that a group of criteria and their numerical characteristics for evaluating the effectiveness of additives plastifikato-ditch under development: the energy of formation of complexes,  $\Delta H_f$ , kJ/mol, dipole moment, D; concentration active additives.

**Key words:** additives, plasticizers, electronic structure, calculus of characteristic.

### REFERENCES

1. Yuhnevsky, P.I. On the correlation vodoreduutsiruyuschej efficiency with the value of the dipole moment of chemical additives, plasticizers [Text] / P.I. Yuhnevsky, V.M. Zelenkovsky, V.S. Soldatov // Technology Concrete. — 2010. — N 9–10. — P. 28–29.
2. Yuhnevsky, P.I. Determination of dipole moments of the additives of plasticizers for cement concrete [Text] / P.I. Yuhnevsky // Bulletin of National Technical University. — 2010. — N 2. — P. 11–14.
3. Yuhnevsky, P.I. The determining role of functional groups and types of bonds in the structure of molecules of chemical additives, plasticizers [Text] / P.I. Yuhnevsky // Construction Science and Technology. — 2011. — N 4. — P. 25–27.

УДК 691.55:666.92

О.В. КАРПОВА, В.И. ЛОГАНИНА, Е.Е. СИМОНОВ

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ИЗВЕСТКОВО-ДИАТОМИТОВОЙ ДЕКОРАТИВНОЙ ШТУКАТУРКИ ДЛЯ ОТДЕЛКИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ\*

Приведены сведения об эффективности применения декоративной штукатурки на основе разработанной известково-диатомитовой смеси на влажностный режим ограждающей конструкции. Анализируется положение нулевой изотермы и зоны конденсации в толще конструкции.

**Ключевые слова:** декоративная штукатурка, влажностный режим конструкции, зона конденсации.

В ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства» разработаны составы сухих строительных смесей (ССС) с применением модифицированного диатомита. ССС предназначены для отделки стен зданий. Рецептура ССС содержит гашеную известь, модифицированный диатомит, песок, пигмент, органические добавки [1]. Модификация диатомита заключалась в обработке его золем кремниевой кислоты с целью повышения активности взаимодействия с

минеральным вяжущим [2]. Результаты проведенных исследований показали, что предлагаемые составы ССС обладают достаточной водонеудерживающей способностью, составляющей 96–97 %, адгезионной прочностью, равной 0,9–1,4 МПа, жизнеспособность готовых смесей составляет 14 ч. Покрытия на основе известково-диатомитовых смесей обладают теплоизоляционными свойствами, коэффициент теплопроводности составляет 0,144 Вт / м · °C.

Для оценки влияния штукатурного слоя на основе разработанной ССС на изменение теплового и влажностного режима ограждающих конструкций зданий выполнен теплотехнический расчет стены, конструктивное решение которой приведено на рис. 1. Для расчетов

Рис. 1. Конструктивное решение стены  
1 — кирпичная кладка из сплошного кирпича силикатного (ГОСТ 379) на цементно-песчаном растворе,  $\rho = 1800 \text{ кг} / \text{м}^3$ ; 2 — утеплитель; 3 — многослойная штукатурка; 4 — штукатурка

были выбраны по карте климатического районирования города, находящиеся в различных климатических условиях и зонах влажности: Москва,

\* Работа выполнялась в рамках госконтракта с Министерством образования и науки РФ № 13.G25.31.0092.

Якутск, Пенза [3, 4]. В качестве теплоизоляционного слоя в работе приняты плиты из:

— пеностеклокерамики, изготавливаемые с применением опалкристобалитовых пород на ООО «Диатомовый комбинат», г. Инза Ульяновской области, плотностью  $\rho = 260 \text{ кг}/\text{м}^3$  и коэффициентом теплопроводности  $0,098 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;

— пенополистирола плотностью  $\rho = 100 \text{ кг}/\text{м}^3$  и коэффициентом теплопроводности  $0,041 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;

— стеклянного штапельного волокна на синтетическом связующем плотностью  $\rho = 60 \text{ кг}/\text{м}^3$  и коэффициентом теплопроводности  $0,06 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ .

При расчетах рассматривалось три варианта отделки:

1 — внутренняя и наружная поверхности конструкции стены отделаны цементно-песчаным раствором плотностью  $\rho = 1800 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

2 — внутренняя поверхность конструкции отделана цементно-песчаным раствором плотностью  $\rho = 1800 \text{ кг}/\text{м}^3$ , наружная поверхность конструкции стены отделана штукатуркой на основе известково-диатомитового состава плотностью  $840 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;

3 — внутренняя и наружная поверхности конструкции отделаны штукатуркой на основе известково-диатомитового состава плотностью  $840 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Предварительными расчетами установлено, что толщины плит утеплителей применительно к условиям г. Пензы составляют на основе:

— пенополистирола —  $0,09 \text{ м}$ ;

— стеклянного штапельного волокна на синтетическом связующем —  $0,132 \text{ м}$ ;

— пеностеклокерамики —  $0,215 \text{ м}$ .

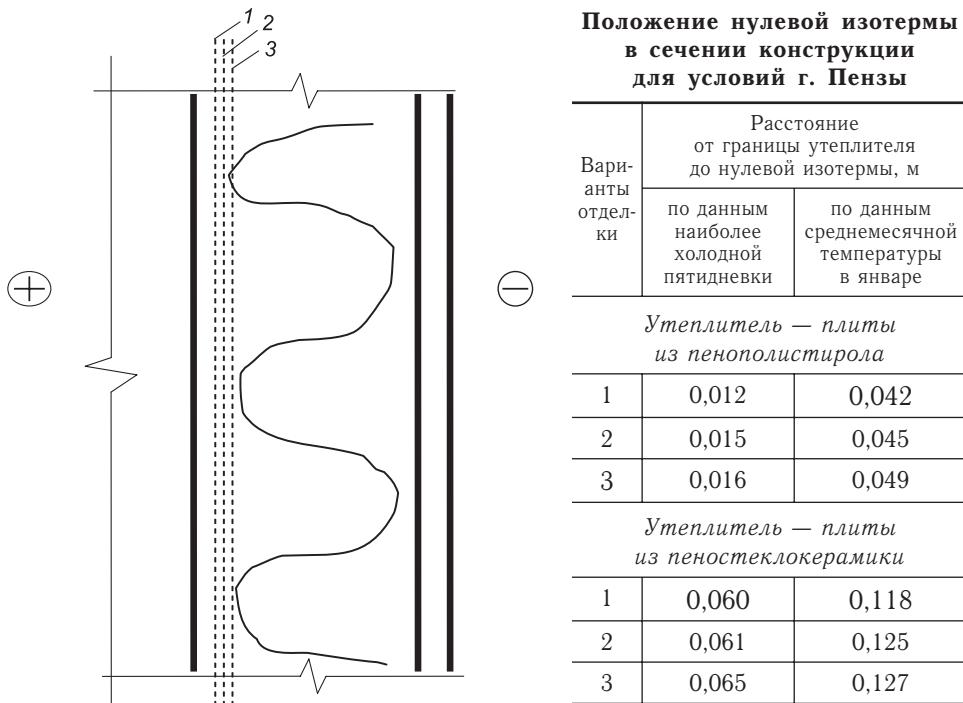
При стационарных условиях диффузии водяного пара через ограждающую конструкцию для определения температуры  $\tau_i$ , максимального парциального давления водяного пара  $E_i$  и действительного парциального давления  $e_i$  водяного пара на границах слоев конструкции стены была разработана компьютерная программа, которая сделана с помощью средств Visual Basic 6.0. График изменений температур, а также график изменения максимальной и действительной упругости водяного пара в стене строятся с помощью метода Pset.

При расчетах влажностного режима различных вариантов стеновой конструкции за наружную температуру воздуха принимали среднемесячную температуру января, а также температуру наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92.

Результаты выполненных расчетов показывают, что для условий г. Пензы для всех видов утеплителей и при оштукатуривании внешней и внутренней поверхности стены цементно-песчаным раствором плотностью  $\rho = 1800 \text{ кг}/\text{м}^3$  возможна конденсация влаги в толще утеплителя. При применении предлагаемой известково-диатомитовой штукатурки конденсация влаги отсутствует. Для условий г. Якутска конденсация влаги наблюдается для всех рассматриваемых случаев.

Установлено, что при применении в качестве штукатурки разработанного известково-диатомитового состава наблюдается смещение нулевой изотермы в сторону пониженных температур (рис. 2). В таблице приведены значения границы нулевой изотермы в теплоизоляционном слое для условий г. Пензы по данным наиболее холодной пятидневки и среднемесячной температуры января.

Установлено, что при отделке конструкции с внешней и внутренней стороны штукатуркой на основе разработанного известково-диатомитово-



*Рис. 2. Распределение нулевой изотермы по сечению конструкции*

1 — конструкция отделана с двух сторон цементно-песчаной штукатуркой; 2 — конструкция отделана с внутренней стороны цементно-песчаной штукатуркой, с наружной стороны известково-диатомитовой; 3 — конструкция отделана с двух сторон известково-диатомитовой штукатуркой

го состава нулевая изотерма смещается на 4–7 мм (утеплитель — плиты из пенополистирола) и 5–9 мм (утеплитель — плиты из пеностеклокерамики) в сторону пониженных температур по сравнению с применением штукатурки на основе цементно-песчаного раствора.

Выявлено, что при наличии конденсации в толще конструкции (по результатам расчета в условиях наиболее холодной пятидневки) при применении предлагаемого известково-диатомитового состава происходит смещение зоны конденсации в сторону пониженных температур, что свидетельствует о более интенсивном высыхании конструкции. Согласно расчетам, при отделке конструкции с двух сторон штукатуркой на основе известково-диатомитового состава линия пересечения  $E$  и  $e$  наблюдается в толще теплоизоляционного слоя на расстоянии 0,088 м, а при применении цементно-песчаного раствора — на расстоянии 0,085 м.

Таким образом, проведенные исследования и расчеты показали, что применение предлагаемой ССС на основе диатомита способствует повышению долговечности ограждающей конструкции, обеспечивая более благоприятный влажностный режим наружного ограждения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Никифоров, Е.А. Особенности структурообразования известковых композитов с применением модифицированного диатомита [Текст] / Е.А. Никифоров, В.И. Логанина, О.А. Давыдова, Е.Е. Симонов // Региональная архитектура и строительство. — 2011. — № 2(11). — С. 4–9.
- Логанина, В.И. Исследование закономерностей влияния золя кремниевой кислоты на структуру и свойства диатомита [Текст] / В.И. Логанина, О.А. Давыдова, Е.Е. Симонов // Строительные материалы. — 2011. — № 12. — С. 63–66.

3. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. Государственный комитет Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному комплексу (Госстрой России). — М., 2000. — 57 с.
4. Фокин, Г.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий [Текст] / Г.Ф. Фокин; под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина. — 5-е изд., пересмотр. — М. : АВОК-ПРЕСС, 2006. — 256 с.

*КАРПОВА Ольга Викторовна, канд. техн. наук, доц.*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

*ЛОГАНИНА Валентина Ивановна, д-р техн. наук, проф.*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

*СИМОНОВ Евгений Евгеньевич, асп.*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

Получено 12.03.12

**Karpova Olga Victorovna**, candidate of technical sciences, assistant professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

**Loganina Valentina Ivanovna**, doctor of technical sciences, professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

**Simonov Evgeniy Evgenievich**, post-graduate student, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

## **EFFECTIVENESS OF CALC-DIATOMITE DECORATIVE PLASTER FINISHES FOR FENCING CONSTRUCTION**

Data on the efficacy of plaster on the basis of the developed diatomite-lime mixture to moisture conditions cladding. We analyze the position of the zero isotherm and the condensation zone in the interior design.

**Key words:** decorative plaster, construction moisture conditions, the zone of condensation.

### **REFERENCES**

1. Nikiforov, E.A. Peculiarities of structure formation of lime composites using modified diatomite [Text] / E.A. Nikiforov, V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // Regional architecture and engineering. — 2011. — N 2(11). — P. 4–9.
2. Loganina, V.I. Issledovanie patterns of influence of the sol of silicic acid on the structure and properties of diatomite [Text] / V.I. Loganina, O.A. Davydova, E.E. Simonov // Building Materials. — 2011. — N 12. — P. 63–66.
3. СНиП 23-01-99. Building Climatology. Russian Federation State Committee for Construction and Housing Complex (Russian State Committee for Construction). — M., 2000. — 57 p.
4. Fokin, G.F. Construction Firing Enclosing Parts of Buildings [Text] / G.F. Fokin; Ed. Yu.A. Tabunshikova, V.G. Gagarina. — 5th ed. — M. : AVOK-PRESS, 2006. — 256 p.

УДК 691.55:666.92

А.К. ТУЛЯГАНОВ, В.А. БЕЗБОРОДОВ

**СУХИЕ ШТУКАТУРНЫЕ КОМПОЗИЦИИ  
НА ЦЕМЕНТНОЙ ОСНОВЕ,  
АРМИРОВАННЫЕ БАЗАЛЬТОВЫМИ ВОЛОКНАМИ**

В настоящее время при строительстве новых и реконструкции существующих зданий различного назначения активно используется система наружного утепления «мокрого» типа с тонким штукатурным слоем. В качестве утеплителя в таких системах используются современные эффективные теплоизоляционные материалы с низким коэффициентом теплопроводности. В лаборатории НГАСУ (Сибстрин) проведена научно-исследовательская работа, направленная на получение штукатурного состава, имеющего высокие показатели водостойкости, трещиностойкости и обладающего высокими адгезионными характеристиками.

**Ключевые слова:** сухие строительные смеси, композиции, армирующие волокна, трещиностойкость, долговечность.

Времена унифицированных, похожих друг на друга фасадов зданий ушли в прошлое. Новое время диктует необходимость создания объектов разнообразных по дизайну и вместе с тем экономичных, надежных и долговечных. Привычные конструкции из кирпича и бетона быстро заменяются фасадами, выполненными из разнообразных современных материалов, таких, например, как системы наружного утепления «мокрого» типа [1].

Сегодня на рынке представлено множество цементных штукатурок, но качественный состав найти крайне сложно, так как к смесям, эксплуатируемым при отделке фасадов, предъявляются высокие технические требования (хорошая адгезия, водостойкость, трещиностойкость и др.).

Разрабатываемый штукатурный состав должен обладать данными качествами, а именно хорошей адгезионной способностью к материалу стены, быть водостойким и трещиностойким.

На первом этапе разработки проведен эксперимент по подбору оптимального состава цементной штукатурки. В экспериментах сырьевыми материалами для приготовления штукатурных сухих смесей служили портландцемент серый марки 400, известь-пушонка, природный кварцевый песок, эфиры целлюлозы, известняковая мука, армирующие волокна.

Наилучшим эксплуатационным показателям соответствует состав, включающий, мас. %: цемент — 20; кварцевый песок — 65; известняковая мука — 10; гашеная известь — 5; метилцеллюлоза — 0,3; армирующий элемент — 0,6. С помощью этих штукатурных составов для отделки фасадов зданий, позволяющих получить отделочные покрытия достаточно плотные и твердые, имеющие повышенную адгезию, прочность сцепления с бетоном и кирпичом составляет 1,6 МПа.

В качестве водоудерживающих добавок целесообразно вводить эфиры целлюлозы, которые проявляют в сухих штукатурных смесях значительный «загущающий» эффект и лучшую адгезионную связь с телом стены. Введение 0,2...0,4 % к массе смеси добавок эфиров целлюлозы типа Walocel MKX 70000 позволяет регулировать процессы, формировать во-

доудерживающую способность. При этом наблюдается и вторичный эффект модификации: растворные смеси становятся более пластичными и удобоукладываемыми, вероятно, как следствие их поверхностной активности и предотвращения явления «высыхания», т. е. замедления гидратации цемента из-за потери воды в растворе.

Для цементных композиций было определено оптимальное содержание метилцеллюлозы, равное 0,3 %.

Для улучшения физико-механических свойств сухих штукатурных смесей матрицы цементного вяжущего наполняются высокодисперсными минеральными частицами различной природы и фракционного состава. При этом не только улучшаются прочностные и деформационные характеристики материалов, но и появляется возможность направленного формирования макро- и микроструктуры композита, а также существенного расширения сырьевой базы за счет использования местного сырья [2].

Как правило, для улучшения качественных показателей сухих штукатурных смесей используются плотные мелкие заполнители (кварцевый песок) и заполнители (карбонаты кальция).

Мелкий заполнитель — кварцевый песок применяется в зависимости от назначения различного гранулометрического состава: для окончательной отделки используется песок фракции менее 0,14 мм, а для обычного штукатурного слоя кварцевый песок фракций: 0,06...0,125 мм — 20 %; 0,125...0,25 мм — 30 % и 0,25...0,4 мм — 50 %.

Карбонаты кальция (мел, известняк, мрамор) вводят для уменьшения водоотделения, водопотребности и расслаиваемости смесей. В работе использовали известняковую муку с удельной поверхностью 450 м<sup>2</sup>/кг. Введение известнякового наполнителя приводит к повышению водоудерживающей способности, пластичности, однородности, а также улучшает водостойкость раствора [3].

Возникающие трещины — следствие реологических свойств гелевой структурной составляющей цементного камня и капиллярных явлений, протекающих в твердеющем растворе. Наиболее перспективное направление с целью повышения трещиностойкости — введение в состав сухих композиций натуральных или синтетических волокон.

В настоящее время на рынке представлены следующие виды волокон — базальтовые, полиакрилонитриловые и целлюлозные, характеристики которых даны в табл. 1.

Таблица 1

Тип волокна	ПАН, Ricem	Целлюлозные Techocell	Базальтовое волокно
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	1180	1100–1300	1500
Диаметр, мкм	6...20	Около 25	25
Прочность на разрыв, ГПа	0,6...10	0,02...0,50	1,5
Удлинение при разрыве, %	5...10	0,5	0,1

Цели армирования сухих строительных смесей волокнами можно сформулировать следующим образом:

- увеличение прочности при растяжении и изгибе;
- увеличение ударной вязкости;
- компенсация недостатков фракционного состава;
- снижение усадки, которая возникает при затвердевании строительного раствора;

- как следствие, увеличение трещиностойкости (за счет релаксации напряжений в цементном камне как при процессах кристаллообразования, так и при эксплуатации);
- увеличение деформационной способности цементного камня [4].

На втором этапе был осуществлен подбор оптимального содержания армирующих волокон в композиции. Приведены предварительные испытания для поиска интервалов варьирования. На основе проведенных экспериментов (табл. 2) выявлено, что при введении 0,6 % армирующих волокон возрастает прочность при изгибе, улучшается водостойкость, а также прочность при сжатии. В составах, представленных в табл. 2, использовалась обычная не модифицированная растворная смесь с различным содержанием армирующих волокон, а в сухих штукатурных композициях и покрытиях на их основе, как правило, применялись базальтовые волокна. Эти составы имеют следующие свойства: предел прочности при сжатии — 11,11 МПа; предел прочности при изгибе — 3,18 МПа и водоудерживающая способность — 99,8 %.

Таблица 2

Содержание компонентов, мас. %	Предел прочности, МПа		Адгезия, МПа	Средняя плотность, кг / м <sup>3</sup>	Водопоглощение, %
	при сжатии	при изгибе			
<i>Базальтовые волокна</i>					
0,3	7,58	3,43	1,22	1830	2,00
0,6	8,13	3,82	1,60	1780	1,70
0,9	6,51	3,50	1,61	1760	1,43
<i>Целлюлозные волокна</i>					
0,3	6,44	3,30	1,40	1790	2,09
0,6	5,17	3,60	1,43	1760	1,64
0,9	6,11	3,92	1,45	1740	1,77
<i>Полиакрилонитриловые волокна</i>					
0,3	8,01	3,43	1,10	1800	1,85
0,6	8,25	3,85	1,30	1770	1,77
0,9	8,15	3,76	1,25	1760	2,64

Преимущества наполненной цементной композиции заключаются:

- в отсутствии внутренних дефектов — микротрещины, микропоры, капиллярные поры;
- в снижении концентрации напряжений, что положительно сказывается на трещиностойкости штукатурного покрытия.

Составы с базальтовыми наполнителями (отечественного производства, г. Красноярск) дают весомый показатель адгезии.

Таким образом, на местных материалах получена сухая штукатурная смесь с высокими эксплуатационными свойствами, фактурная облицовка из которой, устроенная на фасаде здания в г. Новосибирске, эксплуатируется несколько лет.

Кроме того, введение в состав цементных штукатурных композиций армирующих волокон отечественного производства в сравнении с импортными волокнами по технико-экономическим показателям эффективнее на 30 %.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Анохин, В.В. «Термошуба» из Белоруссии — эффективный путь утепления фасадов [Текст] / В.В. Анохин // Строительные материалы. — 1999. — № 2. — С. 18–19.
2. Копаница, Н.О. Тонкодисперсные добавки для наполненных вяжущих на основе цемента [Текст] / Н.О. Копаница, Л.А. Ананкова, М.С. Макаревич // Строительные материалы. — 2002. — № 9. — С. 2–3.
3. Мешков, П.И. От гарцовки — к модифицированным сухим смесям [Текст] / П.И. Мешков, В.А. Мокин // Строительные материалы. — 1999. — № 3. — С. 34–35.
4. Василик, П.Г. Применение волокон в сухих строительных смесях [Текст] / П.Г. Василик, И.В. Голубев // Строительные материалы. — 2002. — № 9. — С. 116–117.

ТУЛЯГАНОВ Александр Константинович, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

БЕЗБОРОДОВ Владимир Алексеевич, канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

Получено после доработки 02.03.12

**Tulyaganov Aleksandr Konstantinovich**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Bezborodov Vladimir Alekseevich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

### DRY PLASTERING COMPOSITIONS BASED ON CEMENT SOLUTION REINFORCED BY BALSATIVE FIBRES

Today «wet» type systems of external warmth keeping with thin plastering layer are widely used in constructing and reconstructing of different buildings. Modern and effective heat-insulating materials with low factor of heat conductivity are used as a heater in such systems. NSUACE Laboratory has carried out a research directed on production of new plaster structure with higher parameters of water resistance, fracture strength and with high adhesiveness.

**Key words:** dry building mixtures, composition, reinforcing fibers, fracture strength, durability.

### REFERENCES

1. Anokhin, V.V. «Thermocoat» from Belarus — the effective way of facade heat insulation [Text] / V.V. Anokhin // Building Materials. — 1999. — N. 2. — P. 18–19.
2. Kopanitsa, N.O. Fine admixtures for the filled binding materials based on cement [Text] / N.O. Kopanitsa, L.A. Anikanova, M.S. Makarevich // Building Materials. — 2002. — N. 9. — P. 2–3.
3. Meshkov, P.I. From the dry two-component mixture of binding and filling materials to the modified dry mixture [Text] / P.I. Meshkov, V.A. Mokin // Building Materials. — 1999. — N. 3. — P. 34–35.
4. Vasilik, P.G. Application of Fibers in dry building mixtures [Text] / P.G. Vasilik, I.V. Golubev // Building Materials. — 2002. — N. 9. — P. 116–117.

## ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 627.824.2/.3

М.И. БАЛЬЗАННИКОВ, С.А. ПИЯВСКИЙ, М.В. РОДИОНОВ

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ НИЗКОНАПОРНЫХ ГРУНТОВЫХ ПЕРЕЛИВНЫХ ПЛОТИН

Проанализированы конструкции низконапорных грунтовых переливных плотин, особенности крепления гребня и низового откоса плотин. Приведено описание разработанной авторской конструкции плотины, использующей геосинтетические оболочки. Предложена классификация грунтовых переливных плотин.

**Ключевые слова:** гидротехнические сооружения, грунтовые переливные плотины, конструкция плотин, крепление низового откоса, классификация переливных плотин.

Глухие плотины гидротехнических узлов (гидроузлов) выполняют очень важную и ответственную роль подпорного сооружения, обеспечивающего создание сосредоточенного напора в месте их расположения и образования водохранилища. Глухие плотины могут быть бетонными или грунтовыми (плотинами из местных строительных материалов).

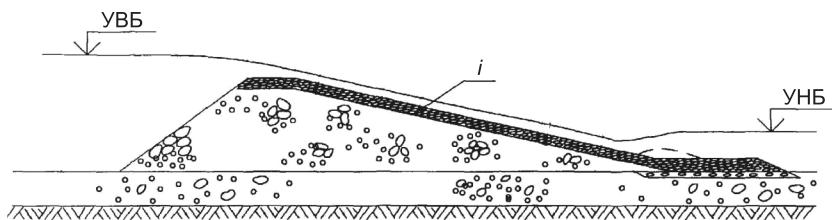
Глухие грунтовые плотины получили большое распространение из-за их низкой стоимости и хороших показателей технологичности возведения по сравнению, например, с бетонными плотинами. Однако в составе сооружений гидроузла с грунтовой плотиной для пропуска паводковых вод необходимо предусматривать специальные бетонные водопропускные сооружения. Это приводит к значительному удорожанию строительства гидроузла в целом.

При проектировании низконапорных грунтовых плотин целесообразно отказываться от дорогостоящих специальных водосбросных сооружений, а пропуск паводковых вод предусматривать непосредственно по гребню и низовому откосу плотины, т.е. использовать грунтовые переливные плотины. В этом случае важно правильно подобрать материал и выбрать конструкцию элементов специального крепления низового откоса, предотвращающих размыв и разрушение тела грунтовой плотины и к тому же обеспечивающих эффективное гашение избыточной кинетической энергии пропускаемого по плотине водного потока.

Известно большое количество весьма многообразных конструктивных решений грунтовых плотин и креплений низового откоса, обеспечивающих его защиту от разрушения при пропуске расходов воды переливом. Одни из самых древних — конструкции плотин с креплением низового откоса грунтового водоподпорного сооружения камнем. Примером может служить плотина «The Barrier of Pagans» в Египте, насчитывающая по данным археологов более пяти тысяч лет [3]. По конструкции и методам строительства эта плотина напоминает древние пирамиды. Откосы ее были возведены из тесаного камня с перевязкой швов без применения раствора с уклоном 1 : 1,3. Плотина не имела противофильтрационно-

го элемента и, по мнению специалистов, занимающихся ее изучением, со временем была разрушена фильтрационным потоком во время прохождения паводка. Это явилось свидетельством недостаточной надежности таких плотин.

Широко известны конструкции грунтовых переливных плотин с креплением низового откоса каменной наброской, прообразом которых являются плотины «индийского типа» [1]. Эти водоподпорные сооружения из грунта и камня сооружались весьма распластанного профиля. Уклон верхового откоса составлял от 1:3 до 1:4, а низового — от 1:8 до 1:12 с толщиной каменного крепления в 2–3 диаметра используемого камня. На рис. 1 представлен пример конструкции таких переливных плотин. Они отличались высокой степенью надежности и служили сотни лет. Вместе с тем необходимо отметить и их существенные недостатки — низкие допустимые напоры (до 5–6 м), малые удельные сбросные расходы воды и значительные объемы требуемых каменных материалов.



*Rис. 1. Грунтовая переливная плотина «индийского типа»*

Значительный вклад в совершенствование конструкций грунтовых переливных плотин и технических решений по креплению низового откоса камнем внесли отечественные исследователи С.В. Избаш, Н.П. Пузыревский, П.И. Гордиенко, Н.Н. Беляшевский, И.С. Румянцев и др. Так, в конце 20-х — начале 30-х гг. XX в. в Москве и Ленинграде под руководством профессора Н.П. Пузыревского исследовались грунтовые переливные плотины «индийского типа» высотой уже до 10–15 м, имеющие более обжатый поперечный профиль.

В 40-х годах прошлого века в Московском строительном институте исследованием водосливных плотин из каменной наброски активно занимался П.И. Гордиенко. Проводимые независимо друг от друга исследования показали, что возможность пропуска воды поверх грунтовых сооружений, защищенных каменным креплением, весьма ограничена. При этом удельный расход пропускаемого по низовому откосу потока не должен превышать 5–10  $\text{m}^2/\text{s}$  [3].

Разработанные в то время конструктивные решения плотин, на наш взгляд, были достаточно надежными, но не технологичными при их возведении и поэтому приводили к существенному удорожанию сооружения. Последующее совершенствование конструкций крепления низового откоса грунтовых переливных плотин с использованием камня привело к появлению следующих технических решений:

- с креплением ряжевыми конструкциями, заполненными камнем, причем как из деревянных, известных в России еще с петровских времен (рис. 2, *a*), так и из железобетонных элементов (рис. 2, *б*);
- с креплением габионными конструкциями (рис. 2, *в*);
- с креплением сплошным омоноличиванием верхнего слоя камня бетоном или железобетоном с устройством дренажных выпусков;
- с креплением в виде поперечных полос из уложенного монолитного бетона (рис. 2, *г*).

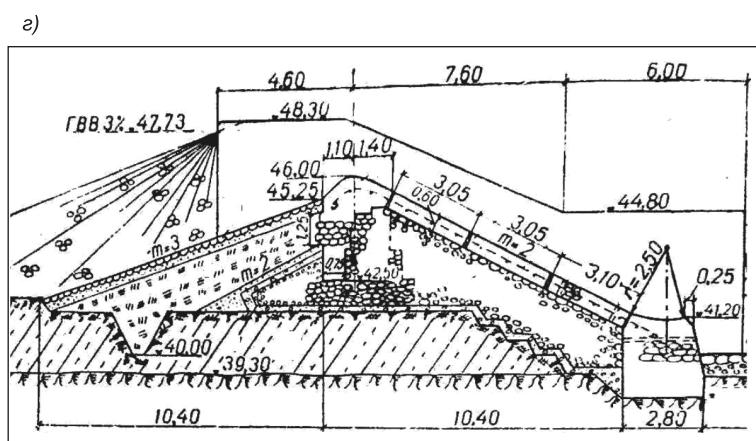
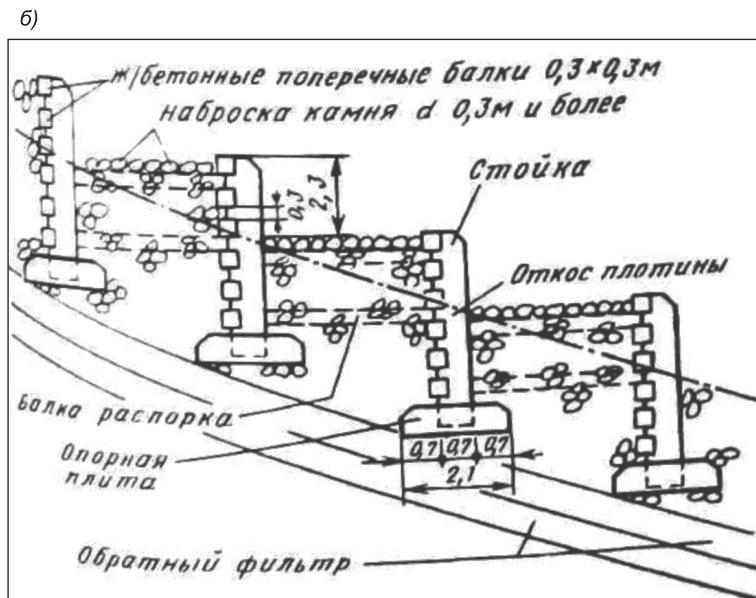
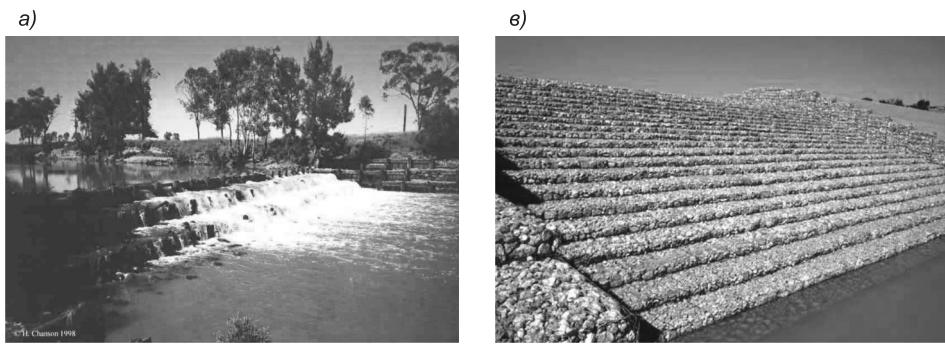


Рис. 2. Конструкции грунтовых переливных плотин с креплением низового откоса  
а — деревянными ряжами; б — железобетонными ряжами; в — габионами; г — железобетоном

Указанные усовершенствованные конструкции крепления низового откоса позволили уменьшить коэффициент заложения низового откоса грунтовой плотины до 1,5–2 и повысить допустимые пропускаемые удельные расходы воды до 20–25  $\text{м}^2/\text{с}$ .

К недостаткам рассмотренных конструкций плотин можно отнести значительное увеличение трудоемкости и стоимости их строительства.

Увеличить пропускаемые поверх грунтовой плотины расходы позволило конструктивное решение по креплению низового откоса, разработанное П.И. Гордиенко в 60-е годы прошлого века. Им была предложена грунтовая плотина, включающая водосливной оголовок на гребне из монолитного железобетона и низовой откос, защищенный сборными железобетонными плитами, имеющими дренажные отверстия в его тонкой нижней части [3]. Конструкция такой плотины позволяла осуществлять пропуск удельных расходов до  $60 \text{ м}^2/\text{с}$ . Однако она также имеет и существенные недостатки: для обеспечения устойчивого режима сопряжения бьефов с поверхностным гидравлическим прыжком требуется весьма пологий низовой откос (от 1:6 до 1:10).

Ю.П. Правдивец своими многочисленными модельными и натуральными исследованиями [3] подтвердил возможность надежной защиты низового откоса грунтовой переливной плотиной с помощью сборных железобетонных плит клиновидной формы, устранив при этом большинство недостатков известных грунтовых плотин. Так, он добился ухода от распластанного профиля плотины за счет изменения характера сопряжения водосливного откоса с дном реки. Для обеспечения сопряжения бьефов поверхностным режимом и фиксации положения поверхностного прыжка было предложено концевой участок водосливного откоса выполнять в виде носка-уступа на скальном основании и носка-ковша на нескальном. Благодаря этому заложение низового откоса грунтовой переливной плотины стало зависеть только от прочностных свойств грунта тела плотины. Существенно повысилась надежность работы такой плотины. В России в соответствии с предложениями Ю.П. Правдивца были построены грунтовые переливные плотины с креплением низового откоса клиновидными плитами. Высота этих сооружений составляла от 7,0 до 20,0 м, удельные сбросные расходы — от 3 до  $20 \text{ м}^2/\text{с}$  [3].

В США широкое распространение получили грунтовые переливные плотины с устройством на низовом откосе водосбросного тракта ступенчатого водослива из укатанного бетона (рис. 3) [4]. Основное преимущество конструкции — высокие темпы производства работ, обусловленные применением технологии укладки укатанного бетона, мало отличающейся от технологии укладки грунта в тело плотины, а именно: слоями по 25–30 см с последующим уплотнением катками. Для выхода фильтраци-



Рис. 3. Грунтовая переливная плотина с креплением низового откоса укатанным бетоном

онных вод в креплении устраиваются дренажные отверстия, а концевой участок крепления низового откоса заглубляется ниже отметки отводящего русла с целью предотвращения размыва.

Весьма эффективным способом сокращения сроков и стоимости строительства грунтовых переливных плотин является использование армированного грунта, позволяющего устраивать весьма обжатый поперечный профиль плотины. Примером может служить построенная в конце 1970-х гг. плотина Эстель высотой 29 м с вертикальным низовым откосом и расчетным сбросным расходом  $90 \text{ м}^3/\text{s}$  [2]. Зона армированного грунта отделена от тела плотины фильтром, поверхность откоса защищена бетонными плитами, а армирование грунта выполнено лентами из гальванизированной стали.

Следует заметить, что для антакоррозийной защиты металлических армирующих элементов в настоящее время в основном используют высокопрочные геосинтетические материалы. Можно считать такие материалы весьма перспективными для использования в гидротехническом строительстве.

В России в объединении «Союзводпроект» был разработан типовой проект 820-04-51.93 — «Плотина земляная насыпная переливная из армированного грунта высотой до 10 м». Проект предусматривал следующие основные элементы плотины: верховой откос с коэффициентом заложения, равным 3; вертикальный низовой откос; водосливной порог из железобетонных плит; противофильтрационный элемент в виде экрана из полиэтиленовой пленки; Г-образный блок, устанавливаемый в нижнем бьефе для защиты армирующих элементов низового откоса.

Конструкция такой типовой плотины представлена на рис. 4. Очевидно, что плотина обладает высокой степенью надежности, однако имеет большое количество конструктивных элементов, что значительно усложняет ее строительство и увеличивает трудоемкость возведения и стоимость.

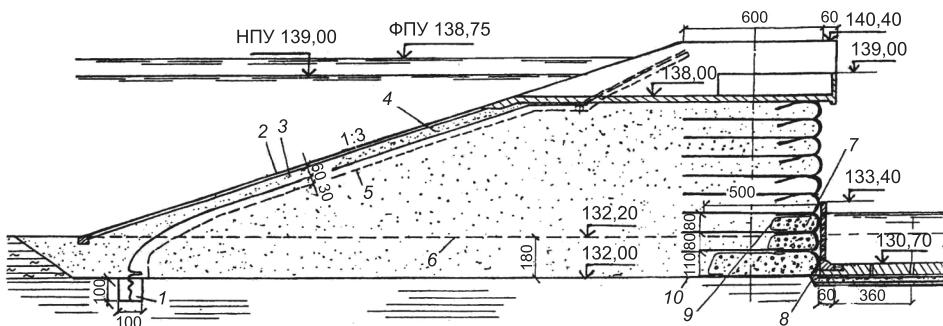


Рис. 4. Конструкция типовой грунтовой переливной плотины

1 — забивка глиной; 2 — сборные ж/б плиты; 3 — подстилающий слой из песка; 5 — полиэтиленовая пленка; 6 — поверхность земли; 7 — гравийно-песчаная смесь; 8 — Г-образный блок; 9 — ткань Дорнит; 10 — ровинговая ткань

В настоящее время, по мнению авторов, конструкция крепления гребня и низового откоса переливной плотины должна отвечать не только общепринятым основным требованиям: высокой надежностью работы и низкой стоимостью, но и обладать современными качествами — возможностью быстрой и технологичной укладкой элементов крепления, возможностью оперативного и малозатратного демонтажа этих элементов для ремонта и повторного использования в конструкции.

На наш взгляд, это можно обеспечить, если в качестве элементов крепления низового откоса использовать геосинтетические оболочки. Та-

кие оболочки представляют собой некоторые емкости из синтетического материала, предусматривающие возможность заполнения их грунтом или каким-либо другим материалом. Для изготовления геосинтетических оболочек используют воздухо- и водопроницаемые тканые геотекстильные материалы. Заполнение оболочек, как правило, производится через впускные рукава земснарядами в виде пульпы, вода при этом отводится через водопроницаемую поверхность оболочки. Поперечное сечение геосинтетических оболочек имеет сложную криволинейную форму и зависит от типа заполнителя, от давления, создаваемого оборудованием для заполнения оболочек, а также от внешних воздействий.

Конструкция грунтовой переливной плотины с использованием в качестве элементов крепления геосинтетических оболочек разработана на кафедре природоохранного и гидротехнического строительства Самарского государственного архитектурно-строительного университета [1]. Ее особенности:

- грунтовое водоподпорное сооружение в пределах гребня плотины и сливного откоса укрепляется геосинтетическими оболочками, заполняемыми грунтом;

- оболочки укладываются на заранее подготовленные горизонтальные площадки, расположенные в пределах низового откоса;

- на контакте оболочек и грунта тела плотины с целью предотвращения вымывания частиц грунта предусматривается укладка фильтра из нетканого геотекстиля;

- в случае необходимости обеспечения устойчивости геосинтетических оболочек по их периметру может предусматриваться укладка армирующих сеток с анкерными устройствами, расположенными в теле грунтового сооружения.

Схема предложенной конструкции плотины приведена на рис. 5.

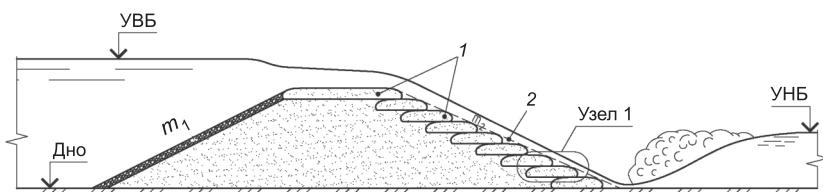


Рис. 5. Схема конструкции грунтового переливного водоподпорного сооружения с геосинтетическими оболочками

Разработанная конструкция грунтового переливного гидротехнического сооружения позволит устранить указанные выше недостатки известных конструкций грунтовых плотин по материалоемкости, трудоемкости и стоимости вследствие применения относительно недорогих геосинтетических оболочек, местных строительных материалов для заполнения оболочек, а также использования высокопроизводительного оборудования (например, земснаряда). Кроме того, конструктивное решение обеспечит выполнение требований по быстроте и легкости устройства элементов крепления откоса, технологичности их демонтажа, ремонта и повторного использования.

Выполненный анализ конструктивных решений грунтовых переливных плотин и применяемых технических решений по обеспечению надежной защиты их низового откоса показывает, что эти водоподпорные и одновременно водопропускные сооружения можно разделить на типы по некоторым классификационным признакам. В целом классификацию грунтовых переливных плотин можно представить в виде, приведенном на рис. 6.



Рис. 6. Классификация грунтовых переливных плотин

Предлагаемая классификация позволит систематизировать все многообразие конструктивных решений грунтовых переливных плотин и более обоснованно производить выбор наиболее эффективных и экономичных конструктивных решений.

**Выходы.** 1. При проектировании низконапорных грунтовых плотин целесообразно пропуск паводковых вод предусматривать непосредственно по гребню и низовому откосу плотины. Такое решение позволит отказаться от дорогостоящих специальных водосбросных сооружений и уменьшить общую стоимость низконапорного гидроузла.

2. Мировой опыт применения грунтовых переливных плотин насчитывает несколько тысяч лет. Конструкции плотин и элементов низовых откосов, защищающих тело плотины от разрушения водным потоком, совершенствуются с целью повышения надежности плотины и обеспечения эффективного гашения энергии сбрасываемого потока.

3. Авторами разработана новая конструкция грунтовой переливной плотины, предусматривающая использование геосинтетических оболочек в качестве элементов крепления гребня и низового откоса плотины.

Преимуществами конструкции являются снижение материалоемкости, трудоемкости и стоимости грунтовой плотины, технологичность их устройства, возможность быстрого ремонта.

4. Предложена уточненная классификация грунтовых переливных плотин.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Б альзанников, М.И. Грунтовые плотины с низовым откосом, допускающим пропуск паводковых вод [Текст] / М.И. Бальзанников, М.В. Родионов // Вестн. Волжск. регион. отд-ния Рос. акад. архит. и строит. наук: сб. науч. тр. Вып.15. — Н. Новгород: ННГАСУ, 2012. — С. 100–105.
2. Каганов, Г.М. Армированный грунт в гидротехническом строительстве [Текст] / Г.М. Каганов, И.М. Евдокимова // Обзорная информация. — М. : ВНИИ НТПИ, 1996. — 60 с.
3. Правдивец, Ю.П. Ступенчатые водосбросы в мировой и отечественной гидротехнике [Текст] / Ю.П. Правдивец // Гидротехническое строительство. — 1993. — № 10. — С. 28–32.
4. Chanson, H. Hydraulic Design of Stepped Spillways and Downstream Energy Dissipators [Text] / H. Chanson // Dam Engineering. — 2001. — V. 11, N 4. — P. 205–242.

**БАЛЬЗАННИКОВ** Михаил Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: sgasu@samgasu.ru

**Самарский государственный архитектурно-строительный университет**  
**ПИЯВСКИЙ** Семен Авраамович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: sgasu@samgasu.ru  
**Самарский государственный архитектурно-строительный университет**  
**РОДИОНОВ** Максим Владимирович, ассист.; E-mail: rodionov\_max@mail.ru  
**Самарский государственный архитектурно-строительный университет**

Получено 21.03.12

**Balzannikov Mikhail Ivanovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: sgasu@samgasu.ru, Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Piyavsky Semen Avraamovich**, doctor of technical sciences, professor; E-mail: sgasu@samgasu.ru, Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**Rodionov Maksim Vladimirovich**, assistant; E-mail: rodionov\_max@mail.ru, Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

### STRUCTURE UPDRADE FOR LOW-PRESSURE SPILLWAY EARTH DAM

Structures of low-pressure spillway earth dams as well as peculiarities of fixing a dam crest and a downstream slope are analyzed. A description of the authors' design of the dam using geosynthetic shells is given. A classification of spillway earth dams is provided.

**Key words:** hydrotechnical structures, spillway earth dams, dam structure, downstream slope fixing, classification of spillway dams.

### REFERENCES

1. Balzannikov, M.I. Gruntovye plotiny s nizovym otkosom, dopuskayushchim propusok pavodkovykh vod [Text] / M.I. Balzannikov, M.V. Rodionov // Vestnik Volzhskogo regionalnogo otsteleniya Rossiyskoy akademii arkhitektury i stroitelnykh nauk. Fasc. 15. Nizhniy Novgorod: NNGASU, 2012. — P. 100–105.
2. Kaganov, G.M. Armirovannyy grunt v gidrotekhnicheskem stroitelstve [Text] / G.M. Kaganov, I.M. Evdokimova // Obzornaya informatsiya. — M. : VNII NTPI, 1996. — 60 p.
3. Pravdivets, Yu.P. Stupenchatye vodosbrosy v mirovoy i otechestvennoy gidrotekhnike [Text] / Yu.P. Pravdivets // Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo. — 1993. — N 10. — P. 28–32.
4. Chanson, H. Hydraulic Design of Stepped Spillways and Downstream Energy Dissipators [Text] / H. Chanson // Dam Engineering. — 2001. — V. 11, N 4. — P. 205–242.

## САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.97.001.84

В.И. КОСТИН, Е.Ю. РУССКИХ

### ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА РАСХОДОВ ХОЛОДА НА СИСТЕМЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗДАНИЙ

Расчет холода следует определять с учетом нестационарности теплового режима помещений. Расчеты необходимо производить для летнего и осенне-весеннего периодов.

Ключевые слова: промышленные здания, кондиционирование воздуха, холод, расчет.

Современные высокотехнологичные производства предъявляют повышенные требования к точности поддержания микроклимата, так как несоблюдение технологических стандартов к параметрам воздуха влияет на качество выпускаемой продукции и может стать причиной брака. С другой стороны, проблема минимизации затрат на системы климатизации по-прежнему остается актуальной. Успешность решения двойной задачи — высокое качество воздуха при минимальных затратах во многом зависит от правильности определения расчетной мощности систем холодоснабжения и закона изменения мощности в процессе регулирования систем обеспечения микроклимата. Затраты холодильной мощности  $Q$  складываются из трех составляющих:  $Q_1$  — компенсация внутренних теплопоступлений;  $Q_2 = Q'_2 + Q''_2$  — компенсация теплопоступлений от внешней среды ( $Q'_2$  — поступления от солнечной радиации,  $Q''_2$  — теплоизменение приточного воздуха от температуры наружного воздуха  $t_n$  до температуры внутреннего воздуха  $t_b$ ). В течение суток составляющие величины  $Q$  меняются в весьма широких пределах.

$Q_1$  может оставаться постоянной величиной, а может изменяться по некоторому закону (ступенчатому или плавному).  $Q'_2$  и  $Q_3$  изменяются пропорционально разности  $t_n - t_b$ . Суточное изменение температуры наружного воздуха характеризуется амплитудой  $At_n$  (разность максимальной и минимальной температур). В теплый период для большинства регионов РФ величина  $At_n$  составляет от 9 до 12 °C. Интенсивность солнечной радиации зависит от времени суток и степени облачности неба. Таким образом, даже при стационарном технологическом процессе тепловой режим помещения будет нестационарным, причем на изменение  $t_b$  оказывают влияние также и теплоинерционные свойства ограждающих конструкций и оборудования. Следовательно, для поддержания температуры внутреннего воздуха на постоянном уровне необходимо регулировать величину подаваемого воздуха как в суточном режиме, так и в течение теплового периода. Неучет тепловой инерции помещения, сведение расчета холодильной мощности к решению стационарной задачи ведет к повышению капитальных и эксплуатационных затрат [1].

© Костин В.И., Русских Е.Ю., 2012

Анализ динамики требуемой мощности системы холодаоснабжения проведем на следующем примере.

Помещение производственного назначения объемом 10 800 м<sup>3</sup>, расположено на первом этаже здания, имеет две наружные стены (с ориентацией на север и юг) и две внутренние. Кратность воздухообмена 4. Внутренние теплопоступления 32,4 кВт, режим работы круглосуточный с поддержанием постоянной температуры  $t_b = 20$  °С. Место расположения: г. Новосибирск. Теплозащитные свойства ограждающих конструкций соответствуют СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий» (табл. 4). Остекление имеет теплоотражающее покрытие.

Климатологические данные принимались по СНиП 23-01-99 «Строительная климатология» и по «Научно-прикладному справочнику климатологии СССР» (СПБ, 1989–1998, ч. 1–6; вып. 1–34).

Расчетные данные: время — 15 июля; температура  $t_h = 26,4$  (обеспеченность 0,98); амплитуда  $A t_h = 11,4$  °С; состояние облачности — ясно.

Расчет производился по программе РНП «АВОК» 5.1-2008<sup>1</sup>, созданной на основе физико-математической модели Ю.А. Табунщикова [2].

Результаты расчета приведены в табл. 1. Несмотря на постоянную величину внутренних теплопоступлений, суточная потребность в холоде

Таблица 1

**Результаты расчета холодопроизводительности систем кондиционирования воздуха, кВт**

Время суток	Месяц				
	июль			май	сентябрь
	$Q_1 + Q_2$	$Q_3$	$\Sigma Q$	$Q_1 + Q_2$	$Q_1 + Q_2$
0	132,42	—	132,42	56,42	24,4
1	130,9	—	130,9	55,83	24,01
2	128,32	—	128,32	54,78	23,28
3	125,9	—	125,9	53,33	22,28
4	120,7	—	120,7	51,5	21,01
5	115,9	—	115,9	49,37	19,52
6	110,6	—	110,6	47,02	17,86
7	105,1	—	105,1	44,56	16,07
8	100,4	4,35	104,75	42,27	14,26
9	97,01	17,42	114,43	40,28	12,61
10	94,55	45	139,55	38,81	11,32
11	93,2	63,87	157,07	37,99	10,54
12	93,1	79,83	172,93	37,89	10,37
13	94,23	92,9	187,13	38,5	10,82
14	96,56	100,15	196,71	39,82	11,87
15	100	103,06	203,06	41,69	13,41
16	100,26	100,15	204,41	43,98	15,28
17	109,05	92,9	201,95	46,51	17,32
18	114,05	79,83	193,88	49,07	19,31
19	118,05	63,87	181,92	51,49	21,05
20	123,43	45	168,43	53,55	22,45
21	127,14	24,67	151,81	55	23,48
22	129	4,35	133,35	56,07	24,13
23	131	—	131	56,5	24,42

<sup>1</sup> «Расчет нагрузки на систему кондиционирования воздуха при нестационарных теплопоступлениях».

будет переменной. Коэффициент неравномерности холодопотребления (отношение максимальной нагрузки к минимальной)  $K_h = 1,95$ .

Из табл. 1 также видно, что в данном случае влияние солнечной радиации на мощность системы холодоснабжения значительно. Рассмотрим динамику изменения солнечной радиации в течение теплого периода для  $52^\circ$  параллели (вблизи нее расположены города: Воронеж, Оренбург, Иркутск, Саратов, Благовещенск) и  $56^\circ$  (города Москва, Нижний Новгород, Екатеринбург, Омск, Новосибирск, Красноярск) (табл. 2).

Таблица 2

**Сопоставление изменения суммарной солнечной радиации  
в характерные для расчета холодопроизводительности систем  
климатизации месяцы, МДж/м<sup>2</sup>**

Ориентация поверхности			Горизонтальная	Вертикальная				
				С	СВ/СЗ	В/З	ЮВ/ЮЗ	Ю
Географическая широта, градусов с.ш.	52	Май	850	176	332	512	573	497
		Июль	882	212	340	518	511	452
		Сентябрь	540	—	191	371	530	584
	56	Май	840	183	326	528	607	541
		Июль	875	215	350	541	542	501
		Сентябрь	486	—	185	366	547	608

Согласно данным табл. 2, в мае затраты холода на компенсацию теплопоступлений от солнечной радиации сопоставимы с июльскими затратами. Заметим также, что число часов с температурой  $t_h \geq 25^\circ\text{C}$  составляет в мае: для Москвы — 3,49 %, для Новосибирска — 3,1 %, для Благовещенска — 3,3 %, а в сентябре — 0,52, 0,83, 1,0 %. Таким образом, если исходить из условия поддержания коэффициента обеспеченности 0,98, то расчетную температуру  $t_h$  для мая следует принимать близкой температуре июля.

Проведенные для мая расчеты показали, что в таком случае отношение холодильной мощности к данным табл. 1 (июль) составит для максимальной мощности 0,913; для минимальной — 0,77.

Таблица 3  
**Среднемесячные температуры воздуха  
для ряда городов РФ, °C**

Город	Месяц	
	май	сентябрь
Архангельск	6,0	7,9
Владивосток	9,9	16,8
Екатеринбург	10	9,2
Москва	11,9	10,7
Краснодар	17	17,6
Новосибирск	10,3	10,1
Санкт-Петербург	9,8	10,9
Саратов	15	14
Якутск	5,8	6,2

Как известно, СНиП 41-01-2003 предусматривает расчет для трех режимов: теплого, переходного, холодного. В качестве параметров наружного воздуха для переходного периода принимается температура  $t_h = 10^\circ\text{C}$ , энтальпия  $J = 26,5 \text{ кДж/кг}$ . Однако подобное сочетание происходит в различные месяцы, при этом значение  $t_h = 10^\circ\text{C}$  может быть и максимально суточным, и минимальным, и средним. Приведенные в табл. 3 данные о среднемесячных значениях  $t_h$  для ряда городов не дают однозначный ответ на вопрос, какой месяц является

ется расчетным для переходного периода для рассмотренного нами типа задач.

В данном случае представляется целесообразным ограничиться нахождением минимальной холодильной мощности. Знание этой величины имеет важное значение для определения степени регулирования компрессоров холодильных машин, а следовательно, и для выбора их типов.

В табл. 1 приведены также расчеты для мая и сентября. Среднемесячные значения  $t_h$  для г. Новосибирска соответственно 10,3 и 10,1 °C,  $A_{t_h}$  — 12,8 и 11 °C. Величина  $t_h = 10$  °C принималась в качестве среднесуточной, степень облачности — нулевая. Максимальные значения  $t_h$  при принятых условиях меньше  $t_b = 20$  °C. В этом случае  $Q_3 = 0$ .

Из табл. 1 видно, что минимально требуемая холодопроизводительность будет в сентябре. Отношение минимальной холодильной мощности к расчетной составляет 5,07 %.

Следует отметить еще одно обстоятельство. Калориферы первой ступени подогрева, как правило, в теплый период включаются в систему охлаждения воздуха. При этом возможны случаи, когда калорифер может переходить из работы в режиме «охлаждения» в режим «нагрева» и, наоборот, в течение суток. При этом, естественно, возникают переходные процессы, следствием которых может быть нарушение требуемого температурного режима помещения. Поэтому калориферные установки и система их регулирования в холодный период должны подбираться таким образом, чтобы продолжительность переходных процессов из режима в режим была бы минимальной. Вопрос этот требует отдельного изучения. Рассмотрение его в задачи данной статьи не входит.

**Выводы.** Важными условиями поддержания в помещениях требуемого микроклимата являются: 1. Проведение расчетов мощности систем охлаждения по физико-математическим моделям, учитывающим нестационарный характер теплообменных процессов.

2. Проведение анализа динамики изменения холодильной нагрузки в течение как летнего, так и осенне-весеннего процессов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Костин, В.И. Возможно ли энергоснабжение без капитальных затрат [Текст] / В.И. Костин // АВОК. — 2010. — № 7. — С. 64–66.
2. Табунщикова, Ю.А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий [Текст] / Ю.А. Табунщикова, М.М. Бродач. — М. : АВОК-ПРЕСС, 2002. — 194 с.

КОСТИН Владимир Иванович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

РУССКИХ Елена Юрьевна, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)

Получено 09.03.12

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

**Russkikh Elena Yuryevna**, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

## **PROBLEMS OF CALCULATION OF EXPENSES OF COLD ON SYSTEMS AIR CONDITIONIRING OF INDUSTRIAL BUILDINGS**

It is necessary to define an expense of cold into account a nonstatioarity of a thermal mode of rooms. Calculations a necessary for making for the summer and spring and autumn periods.

**Key words:** industrial buildings, air conditioniring, cold, calculations.

### REFERENCES

1. Kostin, V.I. Whether the power saving without capital expenses are possible [Text] / V.I. Kostin // ABOK. — 2010. — N 7. — P. 64–66.
  2. Tabunshchikov, Yu.A. Mathematical modeling and optimization of thermal efficiency of buildings [Text] / Yu.A. Tabunshchikov, M.M. Brodach. — M. : ABOK-PRESS, 2002. — 194 p.
-

УДК 697.934:66.081.3

А.Г. АВЕРКИН, Ю.А. АВЕРКИН

## СУШИЛКА ДЛЯ РУК И ВОЛОС И МЕТОДОЛОГИЯ ЕЕ КОНСТРУКТИВНОГО РАСЧЕТА

Приведены сведения о разработке сушилки для рук и волос, позволяющей осуществлять сушильный процесс при помощи воздушного потока с пониженным влагосодержанием. Осушение воздуха реализуется при помощи неподвижного слоя зернистого адсорбента — силикагеля. В сушилке единственным электропотребляющим узлом является вентилятор. Конструкция сушилки позволяет периодически проводить регенерацию адсорбента.

Описана методика конструктивного расчета слоя зернистого адсорбента в условиях изоэнталпийного осушения воздуха на основе числа единиц переноса.

Ключевые слова: осушение воздуха, слой зернистого адсорбента, труба Вентури, десорбция, методика расчета, число единиц переноса.

Сушилки для рук и волос устанавливаются неподвижно на внутренних стенах помещений (в туалетных, ванных комнатах, в парикмахерских и др.).

Назначение данных сушилок — обеспечить ускоренное испарение водяной пленки и водяных капель с поверхности рук и волос головы в поток воздушной струи, выходящей из специальной насадки.

Сушилки для рук и волос, выпускаемые российскими и зарубежными фирмами, представляют собой корпус (воздушный канал), внутри которого расположены вентилятор и электронагреватель в виде электрической спирали [1].

Работа сушилок происходит следующим образом. При подаче напряжения на электродвигатель вентилятора и электронагреватель внутренний воздух за счет работы вентилятора поступает в воздушный канал сушилки, проходит электронагреватель, где нагревается, и в виде горячей воздушной струи выходит из корпуса на рабочий объект (руки или волосы головы).

За счет теплоотдачи температура поверхности рук (волос) повышается, что способствует росту парциального давления водяных паров у ее поверхности. Когда численная величина этого давления превысит парциальное давление водяных паров в воздушной струе, вода с поверхности будет испаряться в воздух.

Движущая сила массообменного процесса для данных условий определяется разностью концентраций водяных паров у поверхности кожи рук (волос) и в воздушном потоке, что создает разность их парциальных давлений.

Недостатками данной конструкции являются повышенный расход электроэнергии (наличие двух потребителей: вентилятор, электронагреватель); возможность перегрева и выхода из строя электронагревателя.

С другой стороны, увеличить движущую силу процесса — разность парциальных давлений водяных паров у поверхности рук и в воздушной струе можно за счет снижения парциального давления водяных паров в

самой воздушной среде путем уменьшения концентрации водяных паров (влагосодержания) при осушении, например, при помощи твердого зернистого адсорбента.

Схема разработанного устройства — сушилки для рук и волос [2] приведена на рис. 1.

Сушилка для рук и волос представляет корпус в виде вертикального цилиндра 1, который имеет верхнюю 2 и нижнюю 3 торцевые неподвижные крышки с перфорацией в виде сквозных отверстий диаметром 2–3 мм. Снаружи крышек в желобных каналах 6 установлены заслонки 4 и 5 с перфорацией, симметричной перфорации крышек. Заслонки 4, 5 соединены друг с другом П-образным рычагом, состоящим из вертикальной рукоятки 12 и двух — верхней 13 и нижней 14 горизонтальных направляющих.

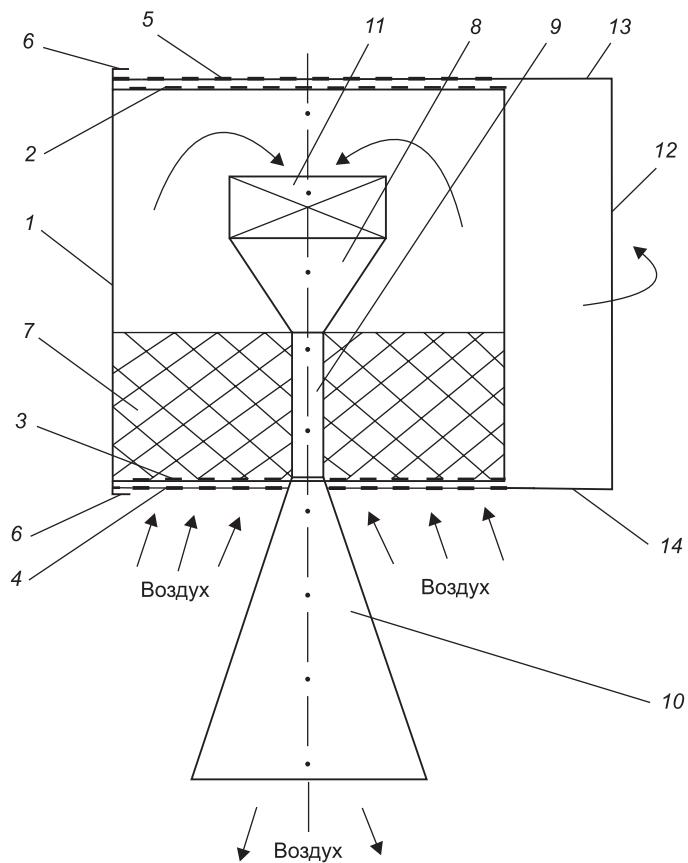


Рис. 1. Схема сушилки для рук и волос

Внутри по оси корпуса 1 установлены сверху вниз элементы трубы Вентури: конфузор 8, горловина 9 с перфорированной боковой поверхностью, другой элемент (трубы Вентури) — диффузор 10 расположен по вертикальной оси снаружи корпуса. На входе в конфузор 8 установлен вентилятор 11. На нижней крышке 3 вокруг горловины 9 по всей длине расположен зернистый адсорбент в виде неподвижного слоя 7.

Сушилка для рук и волос работает в двух режимах: режиме сушки и регенерации зернистого адсорбента.

*Режим сушки* осуществляют поворотом вертикальной рукоятки 12 и связанных с ней направляющих 13, 14 против часовой стрелки на угол  $\alpha$ . При этом направляющие 13, 14 перемещают нижнюю 4 и верхнюю 5 за-

слонки, края которых расположены в желобных каналах 6, в горизонтальной плоскости на тот же угол. В данный момент сквозные отверстия нижней заслонки 4 совпадают со сквозными отверстиями в нижней торцевой крышке 3, в то же время сквозные отверстия в верхней заслонке 5 расположены асимметрично сквозным отверстиям в верхней крышке 2. Они принимают положение, приведенное на рис. 1, т.е. когда каналы для прохода воздуха в верхней торцевой части закрыты, каналы для прохода воздуха в нижней торцевой части открыты. В это же время включается в работу вентилятор 11, который забирает воздух через сквозные отверстия в нижней крышке 3 и заслонке 4. Воздух последовательно проходит неподвижный слой зернистого адсорбента 7, вентилятор 11, конфузор 8, горловину 9, диффузор 10 и в виде воздушной струи выходит наружу на поверхность рук или волосы головы.

Известно [3], что при движении воздуха через трубу Вентури в сечениях ее элементов статическое и динамическое давления воздушного потока отличаются значительно друг от друга. В горловине 9, где сечение потока наименьшее, а скорость наибольшая, динамическое давление потока возрастает, статическое давление снижается. И, наоборот, на выходе из диффузора 10, где сечение потока наибольшее, динамическое давление уменьшается, а статическое увеличивается. Таким образом, трубу Вентури можно использовать в качестве эжектирующего элемента.

При наличии горловины 9 с перфорированной боковой поверхностью часть воздуха, проходящего через неподвижный слой адсорбента, за счет эжекции поступит в горловину, где смешается с основным воздушным потоком.

При использовании адсорбентов, избирательно поглощающих водяные пары, например, силикагеля марки КСМ с размером зерен 4–5 мм [3], воздух, проходя слой адсорбента 7, будет осушаться, на выходе из диффузора 10 влагосодержание воздушной струи снижается до низких (нулевых значений). В данных условиях парциальное давление водяных паров значительно уменьшится (в абсолютно сухом воздухе оно равно нулю), на ту же величину увеличится разность парциальных давлений водяных паров у поверхности рук и в воздушной струе, на что указывалось выше.

В процессе сорбции водяных паров из подаваемого воздуха зернистым адсорбентом (капиллярной конденсации) выделяется теплота адсорбции. Полная удельная теплота адсорбции водяных паров силикагелем составляет  $q_a = 2930 \text{ кДж/кг}$  [3]. Выделение теплоты вызовет повышение температуры осущеной воздушной струи, выходящей из диффузора. Это способствует созданию комфортных условий при сушке рук и волос — процесс осуществляется в потоке теплой воздушной струи.

По истечении определенного времени при сорбции достигается равновесное состояние, при котором поглощение водяных паров прекращается, возникает необходимость в восстановлении прежних свойств сорбента, т.е. в его регенерации, которая заключается в удалении (десорбции) водяных паров из порового пространства зернистого сорбента.

*Режим регенерации зернистого адсорбента* — силикагеля 7 осуществляется путем синхронного поворота в горизонтальной плоскости нижней 4 и верхней заслонки 5 на угол  $\alpha$  по часовой стрелке с помощью вертикальной рукоятки 12 и связанных с ней направляющих 13, 14. При этом сквозные отверстия верхней заслонки 5 совпадут со сквозными отверстиями в верхней торцевой крышке 2, в то же время сквозные отверстия в нижней заслонке 4 примут асимметричное расположение сквоз-

ным отверстиям в нижней крышке 3, что обеспечит взаимное закрытие сквозных отверстий в заслонке 4 и крышке 5. В данных условиях при работе вентилятора 11 воздух поступает внутрь корпуса 1 через открытые сквозные отверстия верхней заслонки 5 и торцевой крышки 2. Затем воздух последовательно проходит вентилятор 11, конфузор 8, горловину 9 (создавая эффект эжекции парогазового потока), диффузор 10 и в виде увлажненной воздушной струи удаляется наружу.

Десорбция водяных паров из порового пространства зернистого сорбента 7 происходит за счет значительного понижения статического давления в канале горловины 9 и, соответственно, в неподвижном слое сорбента, так как канал горловины через перфорированную боковую поверхность имеет доступ к поровому пространству зернистого сорбента.

Включение режимов сушки и регенерации можно осуществлять ручным или автоматическим способом, например, при помощи таймера, встроенных инфракрасных датчиков, которые запускают вентилятор при нахождении рук в зоне сушки.

Таким образом, пуск вентилятора при открытых сквозных отверстиях в нижней крышке и закрытых в верхней обеспечивает подачу воздуха через неподвижный слой адсорбента, его осушение и небольшой нагрев. На выходе из трубы Вентури теплая абсолютно сухая воздушная струя производит интенсивную сушку рук или волос. Десорбция водяных паров для регенерации адсорбента осуществляется понижением давления в его слое за счет эффекта эжекции парогазов перфорированной поверхностью горловины при закрытии и открытии отверстий соответственно в нижней и верхней крышке с помощью синхронного поворота заслонок П-образным рычагом.

К достоинствам разработанной сушилки для рук и волос следует отнести:

- снижение расхода электроэнергии (исключен электронагреватель);
- увеличение срока эксплуатации сушилки из-за отсутствия возможности теплового перегрева ее рабочих элементов;
- повышение комфортности сушильного процесса;
- снижение электробезопасности;
- снижение стоимости.

Конструктивный расчет зернистого слоя адсорбента (площадь поперечного сечения слоя, высота слоя, его объем, аэродинамическое сопротивление слоя) выполним на конкретном примере на основе определения числа единиц переноса [3, 4].

В качестве исходных данных примем: расход воздуха  $L = 200 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $240 \text{ кг}/\text{ч}$ ); температуру воздуха в помещении  $t_{B_1} = 16^\circ\text{C}$ , его относительную влажность  $\varphi_{B_1} = 60\%$  (это соответствует начальному влагосодержанию воздуха  $d_{B_1} = 6,7 \text{ г}/\text{кг сух. возд.}$  согласно рис. 2); влагосодержание воздуха на выходе из сушилки  $d_{B_2} = 3 \text{ г}/\text{кг сух. возд.}$ , т.е.  $d_{B_2} < d_{B_1}$  (влагосодержание воздуха на выходе из сушилки  $d_{B_2}$ , при применении твердых сорбентов может быть снижено до нуля [3]).

Для изображения процесса сорбции водяных паров в изоэнталпийных условиях используем  $I-d$ -диаграмму влажного воздуха, на которой нанесены изолинии равновесного влагосодержания силикагеля марки КСМ [3]. Схема осушения воздуха представлена на рис. 2.

Предлагается следующая последовательность расчета [3]:

- определяется площадь поперечного сечения слоя сорбента  $F, \text{ м}^2$

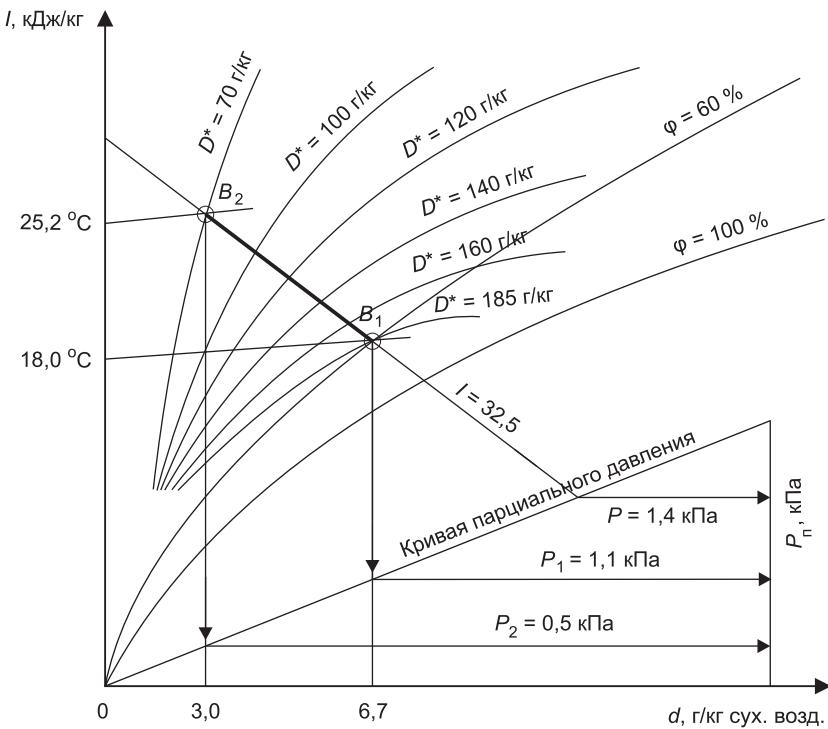


Рис. 2. Схема осушения воздуха на  $I$ - $d$ -диаграмме

$D^*$  — изолинии равновесного влагосодержания силикагеля марки КСМ;  $B_1 - B_2$  — процесс изоэнталпийного осушения воздуха

$$F = \frac{L}{3600 \cdot v} = \frac{200}{3600 \cdot 0,5} = 0,11 \text{ м}^2, \quad (1)$$

где  $v = 0,5 \text{ м/с}$  — скорость воздуха в фасадной поверхности слоя сорбента [4];

— определяется высота слоя сорбента  $H$ , м

$$H = nh, \quad (2)$$

где  $h$  — высота единицы переноса,

$n$  — число единиц переноса. Данную величину определяют методом графического интегрирования с применением модифицированной  $I$ - $d$ -диаграммы влажного воздуха (см. рис. 2).

Для построения изоэнталпии адсорбции  $D^* = f(d)$  задаем ряд значений для  $d$  в интервале 3,0...6,7 г/кг сух. возд., соответственно определяем равновесные им влагосодержания водяных паров в поровом пространстве силикагеля  $D^*$  на  $I$ - $d$ -диаграмме влажного воздуха (см. рис. 2). Эти данные представлены в табл. 1.

Графическое изображение изоэнталпии осушения воздуха приведено на рис. 3. Здесь также представлена рабочая линия процесса.

Таблица 1  
Данные для построения изоэнталпии адсорбции

Номер точки	1	2	3	4	5
$d$ , г/кг сух. возд.	6,7	6,0	5,0	4,0	3,0
$D^*$ , г/кг	185	160	125	93	70

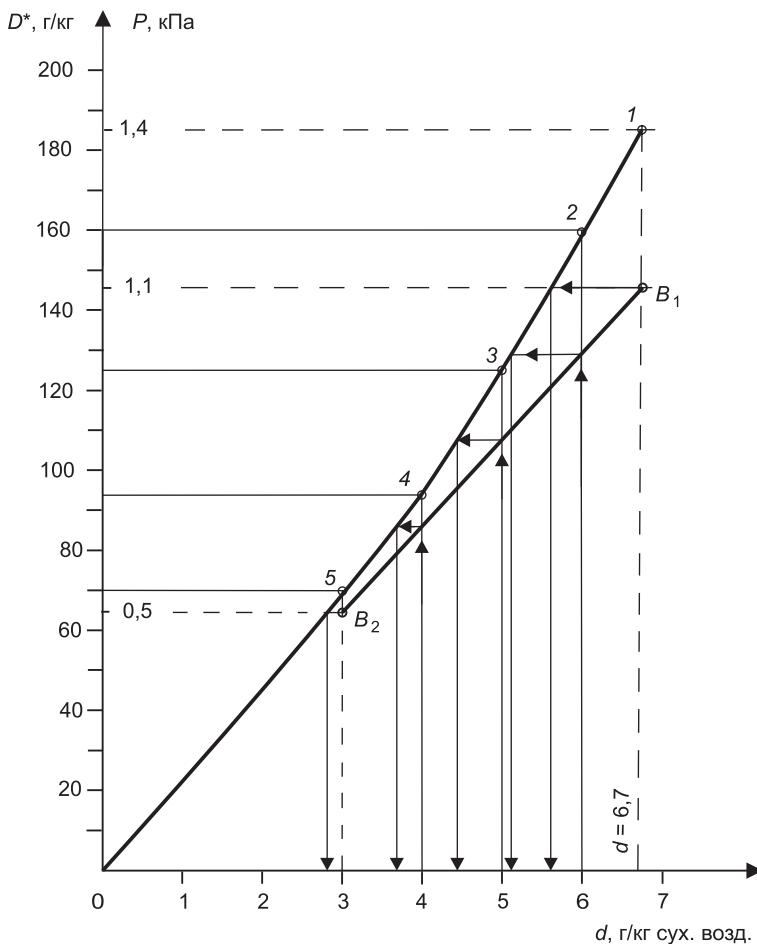


Рис. 3. Изоэнтальпа адсорбции (1-2-3-4-5-0) и рабочая линия  $B_1B_2$

Построение рабочей линии  $B_1B_2$  осуществлено в координатных осях  $P - d$  (здесь  $P$  — парциальное давление водяных паров в воздухе, кПа), привязка оси  $P$  к координатной оси  $D^*$  осуществлена в соответствии с рис. 2.

На рис. 3 показана в виде стрелок схема определения для выбранных рабочих (текущих) влагосодержаний воздуха —  $d_i$  соответствующие равновесные влагосодержания воздуха —  $d_i^*$ . Численные значения этих величин приведены в табл. 2. На их основе строится графическая зависимость  $1/(d - d^*) = f(d)$ , она представлена на рис. 4.

Число единиц переноса определим из выражения

$$n = \int_{d_2}^{d_1} \frac{d(d)}{d - D^*} = f M_1 M_2 = 7,48, \quad (3)$$

где  $f$  — площадь криволинейной трапеции (заштрихованная площадь, рис. 4),

$M_1, M_2$  — масштабы величин по осям ординаты и абсциссы соответственно (см. рис. 4).

Таблица 2  
Данные для построения зависимости

$$1 / (d - d^*) = f(d)$$

Номера точек	$d$	$d^*$	$d - d^*$	$1 / (d - d^*)$
1	6,7	5,6	1,1	0,91
2	6,0	5,1	0,9	1,11
3	5,0	4,4	0,6	1,67
4	4,0	3,6	0,4	2,50
5	3,0	2,8	0,2	5,00

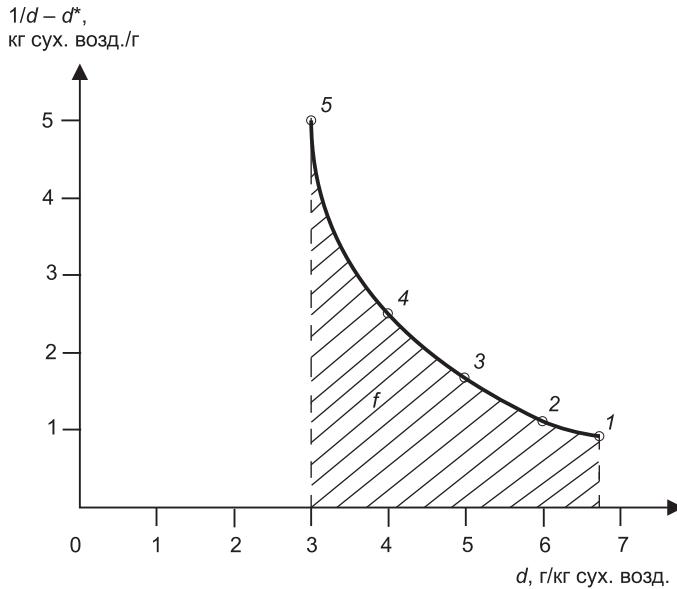


Рис. 4. Зависимость  $1/(d - d^*) = f(d)$

Высоту единицы переноса вычислим по уравнению

$$h = \frac{L\rho}{3600F\beta}, \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность воздуха,  $\text{кг}/\text{м}^3$  (здесь и ниже физические величины воздуха определены при средней температуре процесса  $t_{cp} = \frac{16+25,2}{2} = 20,6^\circ\text{C}$ ,

согласно рис. 2,  $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$  [4]);

$\beta$  — объемный коэффициент массоотдачи,  $\text{с}^{-1}$ :

$$\beta = \frac{\text{Nu}'D}{d_s^2}, \quad (5)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии водяного пара в воздухе,  $\text{м}^2/\text{с}$  ( $D = 24,42 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  [4]);

$d_s$  — эквивалентный диаметр зерна силикагеля,  $\text{м}$  ( $d_s = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ );  $\text{Nu}'$  — диффузионный критерий Нуссельта, для его определения вычисляем модифицированный критерий Рейнольдса  $Re$  и диффузионный критерий Прандтля  $Pr'$ :

$$Re = \frac{vd\rho}{\varepsilon\mu} = \frac{0,5 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2}{0,4 \cdot 18 \cdot 10^{-6}} = 333,3; \quad (6)$$

$$Pr' = \frac{\mu}{\rho D} = \frac{18 \cdot 10^{-6}}{1,2 \cdot 24,42 \cdot 10^{-6}} = 0,61. \quad (7)$$

Здесь  $\varepsilon$  — порозность (для неподвижного слоя адсорбента  $\varepsilon = 0,4$  [4]),  $\mu$  — динамическая вязкость воздуха,  $\text{Па} \cdot \text{с}$  ( $\mu = 18 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$  [4]).

Диффузионный критерий Нуссельта в (5) определяется по формуле [3]:

$$\text{Nu} = 0,395Re^{0,64}Pr^{0,33} \text{ при } Re > 30.$$

Тогда с учетом (6) и (7)

$$\text{Nu} = 0,395 \cdot 333,3^{0,64} \cdot 0,61^{0,33} = 13,82;$$

$$\beta = \frac{13,82 \cdot 24,42 \cdot 10^{-6}}{(4 \cdot 10^{-3})^2} = 21,09 \text{ с}^{-1}. \quad (8)$$

Вычислим высоту единицы переноса

$$h = \frac{200 \cdot 1,2}{3600 \cdot 0,11 \cdot 21,09} = 2,87 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Высота слоя силикагеля согласно (2) составит

$$H = 2,87 \cdot 10^{-2} \cdot 7,48 = 21,47 \cdot 10^{-2} \text{ м (21,5 см).}$$

Объем слоя силикагеля  $V = FH = 0,11 \cdot 21,47 \cdot 10^{-2} = 0,0236 \text{ м}^3$ .

Находим аэродинамическое сопротивление слоя силикагеля<sup>1</sup>  $\Delta P_c$ , Па

$$\Delta P_c = \left( 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d_s^2} \mu v + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 d_s} \rho v^2 \right) H,$$

$$\Delta P_c = \left( 150 \frac{(1-0,4)^2 \cdot 1,8 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5}{0,4^3 \cdot (4 \cdot 10^{-3})^2} + \right. \\ \left. + 1,75 \frac{(1-0,4)1,2 \cdot 0,5^2}{0,4^3 \cdot 4 \cdot 10^{-3}} \right) 21,47 \cdot 10^{-2} = 366 \text{ Па.} \quad (9)$$

Как указывалось выше, сорбция водяных паров из воздуха силикагелем сопровождается выделением теплоты адсорбции. За счет передачи этой теплоты воздуху его температура возрастает.

В приведенном примере повышение температуры воздуха в процессе его осушения видно из рис. 2. При начальной температуре воздуха, забираемого из помещения  $t_{B_1} = 16^\circ\text{C}$  (туалетные комнаты), воздух нагревается на выходе из сушилки до  $t_{B_2} = 25,2^\circ\text{C}$  (температура воздуха повысилась на  $9,2^\circ\text{C}$ ).

Также численное значение температуры воздушного потока на выходе из сушилки можно рассчитать из уравнения теплового баланса. Пренебрегая потерями тепла на нагрев элементов сушилки и в окружающую среду, уравнение имеет вид

$$L\rho(d_{B_1} - d_{B_2})q_a = L\rho c(t_{B_2} - t_{B_1}), \quad (10)$$

где  $c$  — удельная теплоемкость воздуха, равная  $1,005 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$  [4]. Откуда  $t_{B_2} = t_{B_1} + (d_{B_1} - d_{B_2})q_a/c = 16 + (6,7 - 3,0) \cdot 10^{-3} \cdot 2930 / 1,005 = 26,78^\circ\text{C}$ , т.е. температура воздуха повысилась на  $26,78 - 16 = 10,78^\circ\text{C}$ .

Таким образом, из сушилки выходит теплая струя воздуха.

Приведенные результаты расчета сорбционного слоя свидетельствуют о технически достижимых конструктивных и технологических параметрах разработанной сушилки для рук и волос.

Описанная методика расчета осушения воздуха твердым сорбентом в изоэнтальпийном режиме на основе числа единиц переноса с применением модифицированной  $I$ - $d$ -диаграммы влажного воздуха может быть рекомендована для апробации проектным организациям.

<sup>1</sup> Аэроп М.Э., Тодес О.М. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Л.: Химия, 1979. 176 с.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. [www.noirot.ru / pdf / suchilka.pdf](http://www.noirot.ru/pdf/suchilka.pdf)
2. Пат. 2433777 РФ : МПК A47K 10/48. Сушилка для рук и волос [Текст] / А.Г. Аверкин, Ю.А. Аверкин ; заявитель и патентообладатель А.Г. Аверкин. — № 2010108898 ; заявл.09.03.2010 ; опубл. 20.11.11, Бюл. № 32.
3. Аверкин, А.Г. Тепловлажностная обработка воздуха в системах вентиляции и кондиционирования [Текст] / А.Г. Аверкин. — Пенза : ПГУАС, 2011. — 188 с.
4. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии [Текст] / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. — М. : Химия, 1987. — 575 с.

*АВЕРКИН Александр Григорьевич, канд. техн. наук, проф.*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

*АВЕРКИН Юрий Александрович, студ.*

*Пензенский государственный университет архитектуры и строительства*

Получено после доработки 23.03.12

**Averkin Alexander Grigoryevich**, candidate of technical sciences, professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

**Averkin Yury Alexandrovich**, student, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

## HAND DRYER AND HAIR AND ITS CONSTRUCTIVE METHODOLOGY FOR CALCULATING

The information about the development of hand dryers and hair dryer allows you to make the process of using the air flow with low moisture content. Dehumidification is realized by means of a fixed bed of granular adsorbent — silicagel. In the dryer elektropotreblyayuschim node is the only fan. The design of the dryer allows for periodic regeneration of the adsorbent.

A technique for calculating the constructive granular adsorbent layer in iso-enthalpy air drying based on the number of transfer units.

**Key words:** dehumidification, a layer of granular adsorbent, Venturi tube, desorption, method of calculation, the number of transfer units.

## REFERENCES

1. [www.noirot.ru / pdf / suchilka.pdf](http://www.noirot.ru / pdf / suchilka.pdf)
2. Pat. 2433777 RF : IPC A47K 10/48. Hand dryer and hair [Text] / A.G. Averkin, Yu.A. Averkin ; applicant and patentee A.G. Averkin. — N 2010108898 ; for-yavl.09.03.2010, publ. 20.11.11, Bull. N 32.
3. Averkin, A.G. Heat and Air Treatment in Ventilation and Conditioning [Text] / A.G. Averkin. — Penza : PSUAC, 2011. — 188 p.
4. Pavlov, K.F. Examples and Exercises at the Rate of Processes and Apparatuses of Chemical Technology [Text] / K.F. Pavlov, P.G. Romankov, A.A. Noskov. — M. : Khimiya, 1987. — 575 p.

УДК 697.92

В.А. БРОЙДА

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПАРНЫХ ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНЫХ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ УСТРОЙСТВ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ

Рассчитываются расход воздуха, проходящего через парные приточно-вытяжные рециркуляционные устройства с регенерацией тепла, и расход воздуха естественной вытяжной вентиляции. Учитываются расчетный этаж, изменение температуры наружного воздуха, характеристика вентилятора регенеративного устройства.

**Ключевые слова:** регенерация тепла, естественная вытяжная вентиляция, взаимодействие.

Приточно-вытяжное регенеративное устройство (например, УВРК-50 [1]) содержит теплообменник в виде теплоемкой насадки и осевой вентилятор и устанавливается в наружной стене. Небольшой промежуток времени ( $40 \div 70$  с) устройство удаляет наружу теплый воздух помещения, за счет чего нагревается насадка теплообменника. Затем на такой же промежуток времени вентилятор переключается на противоположное направление вращения (на реверс) и подает в помещение наружный воздух. В насадке происходит регенеративный теплообмен, холодный воздух нагревается и осуществляется высокоэффективный возврат тепла помещения.

Для работы с регенерацией тепла и обеспечения непрерывного воздухообмена требуется парная установка таких устройств. В каждый момент времени одно устройство работает на приток, другое — на выброс.

Парные устройства могут вентилировать отдельные комнаты или группы небольших взаимосвязанных комнат, не имеющих других приточных или вытяжных каналов. В таких ситуациях эффективность регенерации тепла высокая, соответствует характеристике этих устройств и их применение целесообразно.

Часто встречаются помещения с естественной вытяжной вентиляцией без притока подготовленного воздуха (наружный воздух поступает через неплотности окон, клапаны в окнах или стенах). Если невозможно отказаться от использования вытяжной системы, то применение парных регенеративных устройств для вентилирования таких помещений приводит к их сложному взаимодействию с вытяжной вентиляцией.

Целью данного исследования является оценка такого взаимодействия.

Расход естественной вытяжной вентиляции  $L_e$  зависит от температур наружного  $t$  и внутреннего воздуха  $t_b$ . Расчетный расход  $L_{e0}$ , м<sup>3</sup>/ч, устанавливается при температуре наружного воздуха  $t = 5$  °С. Находим естественное давление  $P_e$ , Па, при любой температуре наружного воздуха  $t$

$$P_e = g \cdot h \cdot (\rho - \rho_b), \quad (1)$$

а расчетное давление  $P_{e0}$  — по формуле (1) при температуре  $t = 5^{\circ}\text{C}$ , где  $h$  — разница отметок центров регенеративных устройств и устья вытяжного канала, м;  $\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>, которая при любой температуре  $t$  определяется выражением

$$\rho = 353 / (273 + t). \quad (2)$$

Относительный расход естественной вытяжной системы при температуре наружного воздуха  $t$  выражается формулой

$$L_0 = L_e / L_{e0} = ((273 + 5) \cdot (t_b - t) / ((273 + t) \cdot (t_b - 5)))^{1/2}. \quad (3)$$

Заданная производительность регенеративных устройств, работающих на подачу воздуха в помещение и на выброс, одинакова —  $L_y$ , м<sup>3</sup>/ч. Давление, создаваемое осевым вентилятором регенеративного устройства, зависит от расхода проходящего воздуха  $P = P(L)$ , Па. При заданном расходе  $L_y$  характерное давление вентилятора регенеративного устройства  $P_y = P(L_y)$ .

Характеристика проточной части такого устройства, Па/(м<sup>6</sup>/ч<sup>2</sup>), находится по формуле

$$S_y = P_y / (L_y)^2, \quad (4)$$

соответственно, характеристика канала естественной вытяжной системы

$$S_e = P_{e0} / (L_{e0})^2. \quad (5)$$

При совместной работе вытяжной системы и регенеративных устройств в результате взаимодействия устанавливаются иные расходы воздуха: через приточное регенеративное устройство —  $L_1$ , через выбросное устройство —  $L_2$ , а их разница  $L = L_1 - L_2$  составляет расход вытяжной системы.

Записывается уравнение, выражающее равенство располагаемых давлений и потерь давления воздушного потока, проходящего через приточное регенеративное устройство и по каналу естественной вытяжной системы, и аналогичное уравнение для потока, проходящего через выбросное регенеративное устройство:

$$P(L_1) + P_e = S_y \cdot (L_1)^2 + S_e \cdot (L_1 - L_2)^2, \quad (6)$$

$$P(L_2) - P_e = S_y \cdot (L_2)^2 + S_e \cdot (L_1 - L_2)^2. \quad (7)$$

В общем случае зависимость  $P = P(L)$  может быть задана, например, в форме полинома, тогда решение системы уравнений (6, 7) находится численно. В частном случае, если предполагается, что  $P = P(L) = P_y$  — постоянная величина, тогда система (6, 7) — это система уравнений четвертой степени относительно  $L_1$  и  $L_2$ , и ее решение можно представить в виде точных конечных формул [2]:

$$L_2 = (-\beta - (\beta^2 - 4 \cdot \alpha \cdot \gamma)^{1/2} / (2 \times \alpha))^{1/2}, \quad (8)$$

$$L_1 = (2 \times P_y / S_y - L_2)^{1/2}, \quad (9)$$

в которые входят вспомогательные величины:

$$\alpha = 1 + 4 \cdot (S_e / S_y)^2, \quad (10)$$

$$m = P_y/S_y + 2 \cdot (P_y/S_y) \cdot (P_e/S_y) - P_e/S_y, \quad (11)$$

$$\gamma = m^2, \quad (12)$$

$$\beta = -2 \cdot m - 8 \cdot (S_e/S_y)^2 \cdot (P_e/S_y). \quad (13)$$

Результаты решения системы (6, 7) можно выразить в относительных величинах. Взаимодействие характеризуют следующие относительные расходы воздуха: через приточное регенеративное устройство —  $L_1^* = L_1/L_y$ , через выбросное устройство —  $L_2^* = L_2/L_y$ , естественной вытяжной системы —  $L^* = L/L_{e0}$ .

Ниже приводятся результаты расчетов, основанные на решении системы (6, 7). В качестве исходных данных приняты: расчетная температура внутреннего воздуха  $t_b = 20^\circ\text{C}$ ; расчетная высота  $h$  зависит от этажа здания, находится из выражения  $h = 4 + 3 \cdot (N - i)$ , где  $N$  — число этажей в здании (высота этажа принята 3 м),  $N = 9$ ;  $i$  — номер этажа, для которого производится расчет. Представлены расчеты, выполненные при соотношениях заданных расходов регенеративных устройств и естественной вытяжки  $L_y/L_{e0} = 2$  (рис. 1) и  $L_y/L_{e0} = 4$  (рис. 2). Рассматривается два варианта решений:

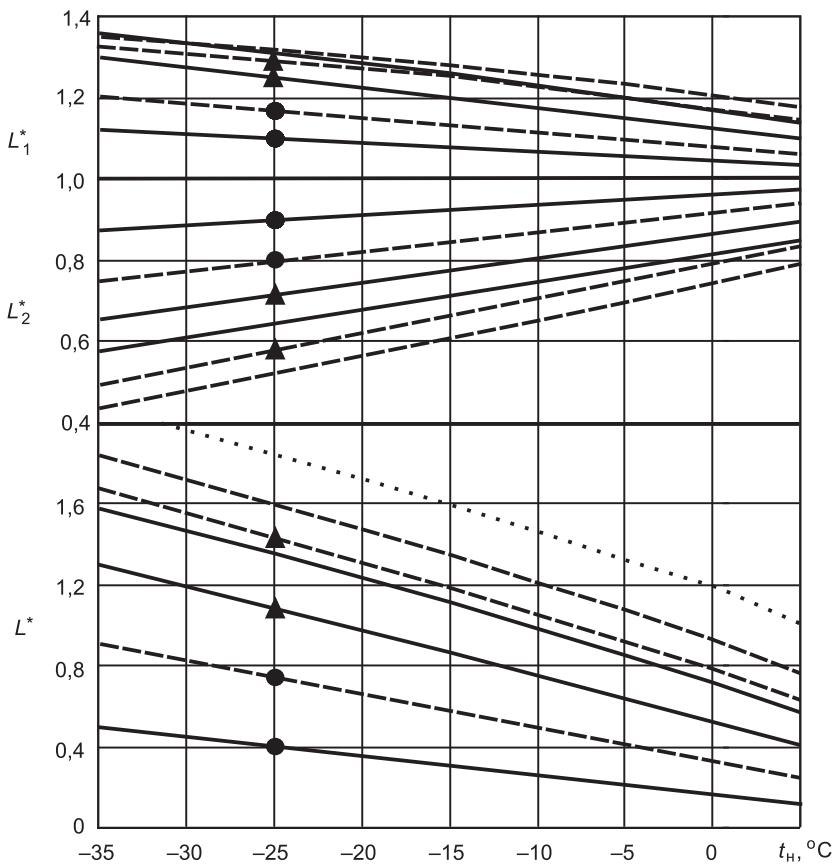


Рис. 1. Относительные расходы  $L_1^*$ ,  $L_2^*$  и  $L^*$  в зависимости от расчетного этажа и температуры наружного воздуха при  $L_y/L_{e0} = 2$

Сплошные линии — результаты расчета при линейной характеристике вентилятора; штриховые — результаты расчета при постоянном давлении вентилятора; со значком «точка» относятся к 9-му этажу здания; со значком «треугольник» — к 5-му; без значка — к 1-му этажу; пунктирная линия отображает зависимость для  $L_0$

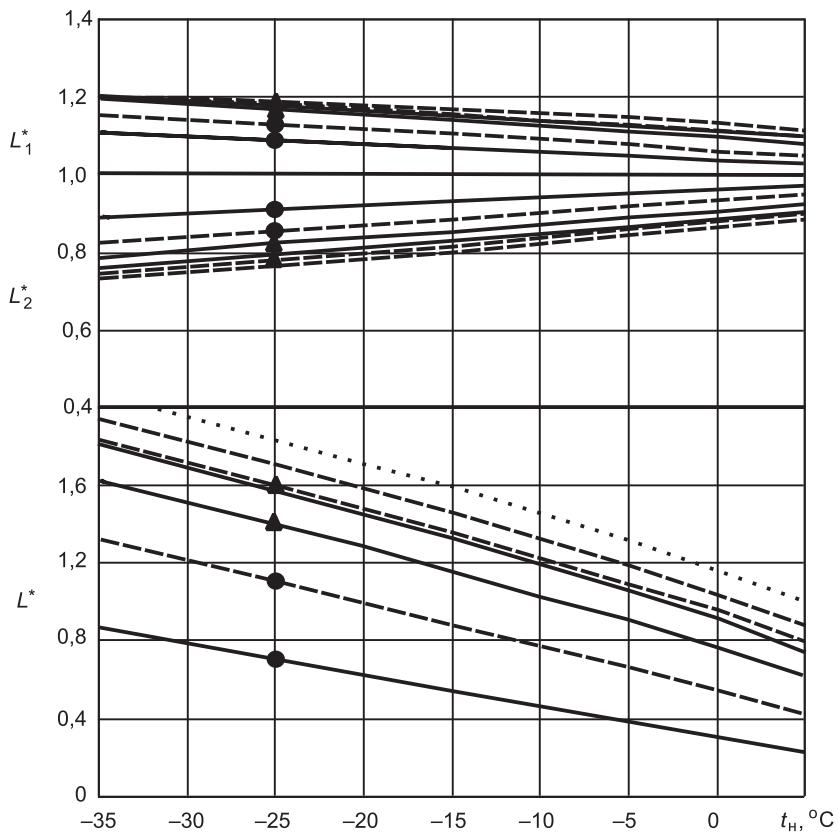


Рис. 2. Относительные расходы  $L_1^*$ ,  $L_2^*$  и  $L^*$  в зависимости от расчетного этажа и температуры наружного воздуха при  $L_y/L_{e0} = 4$

Усл. обозн. см. на рис. 1

—  $P-L$ -характеристика осевого вентилятора регенеративного устройства задается полиномиальной формулой, в частном случае для вентилятора, используемого в УВРК-50, она может быть приближенно выражена линейной зависимостью

$$P = -0,875 \cdot L + 63,75 \quad (14)$$

(при заданном расходе  $L_y = 50 \text{ м}^3/\text{ч}$  характерное давление составляет  $P_y = 20 \text{ Па}$ ), решение находится численным методом;

— упрощенный вариант — давление вентилятора постоянно  $P = P_y = 20 \text{ Па}$ , используется точное решение по формулам (8–13).

Взаимодействие парных регенеративных приточно-вытяжных устройств и естественной вытяжной вентиляции существенно отклоняет расходы перемещаемого ими воздуха от заданных величин. Взаимное влияние больше при малых соотношениях заданных расходов  $L_y/L_{e0}$ . При низких температурах наружного воздуха расходы  $L_1$  и  $L_2$  отклоняются от заданных значений больше, чем при повышенных. Взаимодействие увеличивает приток холодного воздуха и уменьшает выброс теплого воздуха через регенеративные устройства, ухудшает условия регенерации и понижает ее эффективность. При низкой температуре наружного воздуха и пониженной эффективности возникают условия подачи холодного воздуха через приточное устройство, что часто недопустимо.

В результате взаимодействия расход естественной вытяжной вентиляции уменьшается. При низких температурах уменьшение невелико, но при повышенных температурах оно очень значительно, особенно для верхних этажей здания.

Учет  $P-L$ -характеристики вентилятора заметно влияет на расчетные расходы воздуха, особенно при небольшой величине соотношения  $L_y/L_{e0}$ . В частности, при характеристике вентилятора, описанной выражением (14), снижаются отклонения расходов  $L_1$  и  $L_2$  от заданных значений, но увеличивается отклонение расхода естественной вытяжной системы  $L$ .

Взаимное влияние естественной вытяжной вентиляции и парных приточно-вытяжных устройств с регенерацией тепла следует учитывать при их совместном использовании.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прибор приточно-вытяжной УВРК-50. ООО НПФ «Экотерм» // Медиаресурс Ecorussia.info. URL: <http://ecorussia.info/ru/catalod/pribor-pritochno-vytyazhnouyuvrk-50/> (дата обращения 15.03.2012).
2. Б р о й д а, В.А. Эффективность приточно-вытяжных устройств с регенерацией тепла при совместной работе с естественной вытяжной вентиляцией [Текст] / В.А. Бройда // Изв. КГАСУ. — 2011. — № 4(18). — С. 193–197.

*БРОЙДА В.А., канд. техн. наук, доц.; E-mail: broida@mail.ru  
Казанский государственный архитектурно-строительный университет*

Получено 13.03.12

**Broyda V.A.**, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: broida@mail.ru, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

#### INTERACTION OF SUPPLY AND EXHAUST PAIR REGENERATIVE DEVICES WITH NATURAL VENTILATION

Air flow of the supply and exhaust pair of reversible devices with heat recovery and air flow of natural ventilation are calculated. The current floor, the ambient temperature changing, the fan characteristic of the regenerative device is taken into consideration.

**Key words:** heat recovery, natural ventilation, the interaction.

#### REFERENCES

1. The supply and exhaust device—UVRK-50. OOO NPF «Ecoterm» // Media resource Ecorussia.info. URL: <http://ecorussia.info/ru/catalod/pribor-pritochno-vytyazhnouyuvrk-50/> (date of application 15.03.2012).
2. Б р о й д а, В.А. Effectiveness of supply-exhaust heat recovery devices in cooperation with natural ventilation [Text] / В.А. Broyda // News of the KSUAE. — 2011. — N 4 (18). — P. 193–197.

УДК 628.356

В.Д. КАЗАКОВ, Н.Д. ПЕЛЬМЕНЁВА

**ПРИМЕРНЫЙ РАСЧЕТ УСТРОЙСТВА  
ДЛЯ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СТОЧНЫХ ВОД  
В ГОЛОВНОЙ ЧАСТИ АЭРОТЕНКА-ВЫТЕСНИТЕЛЯ**

Рассмотрено движение потоков жидкости в головной части аэротенка-вытеснителя. Предложен примерный расчет основных параметров перемешивающего устройства (инерционного гидродинамического перемешивателя), показывающий возможность интенсифицировать процесс перемешивания сточных вод и активного ила на входе в аэротенк, а также улучшить гидродинамическую обстановку двухкоридорных аэротенков без дополнительной реконструкции одно-, двух-, трехтрубных односторонне расположенных систем аэрации. Предложенная схема размещения устройства позволяет использовать энергию потока поступающих в аэротенк стоков для дополнительного перемешивания всех компонентов биологической очистки.

**Ключевые слова:** очистка сточной воды, аэротенк-вытеснитель, расчет перемешивающего устройства.

В настоящее время накоплен большой теоретический и экспериментальный материал, касающийся реконструкции аэротенков и развития систем аэрации [1–3]. Интерес ученых и исследователей определяется в большей степени тем, что на сооружениях биологической очистки сточных вод от 50 до 70 % всех энергозатрат приходится на долю аэрирования и перемешивания стоков с активным илом. Одним из способов снижения таких энергозатрат является применение в аэротенках дополнительных погружных перемешивающих устройств с низкооборотными двигателями, что позволяет снизить расходы воздуха на аэраторы [4]. В связи с этим улучшение гидродинамической обстановки эксплуатируемых сооружений биологической очистки, а также поиск более экономичных устройств и способов перемешивания продолжает оставаться актуальной научно-технической задачей. Наиболее остро эта проблема наблюдается в аэротенках-вытеснителях, где концентрация активного ила практически постоянна по всей длине сооружения, а нагрузка на ил высока только в начале сооружения и быстро падает уже в первой трети аэротенка. Несмотря на существование и применение различных типов аэраторов, в том числе мембранных и пневмомеханических, до сих пор во многих городах Сибири работают аэротенки, в которых установлены системы аэрации из перфорированных труб. Схемы размещения таких аэраторов таковы, что воздух и аэрируемая жидкость непосредственно контактируют лишь в отдельных пристеночных зонах. Мало того, в процессе реконструкции данный тип аэраторов заменяется на более совершенные аэраторы (пористые полиэтиленовые типа «Полипор»), но при этом по рекомендациям фирм поставщиков или проектировщиков изменяется схема размещения этих аэраторов. Например, до реконструкции пристеночное размещение аэраторов было двухсторонним, а после стало односторонним. То есть изменилась схема циркуляции жидкости в поперечном сечении аэротенка. Вместо двух циркуляционных контуров появился один. Простые замеры движения таких потоков жидкости и концентрации кислорода в

стандартных точках на действующем аэротенке<sup>1</sup> показали неэффективность использования такой схемы. Также по разным причинам подрядчик с согласия проектировщиков изменял устройство для ввода сточной жидкости в аэротенк. Затраты на реконструкцию системы аэрации, связанные с переходом, например, на мембранный или на пневмомеханическую систему, не говоря уже о строительстве четырехкоридорного аэротенка вместо двухкоридорного, слишком значительны для бюджетов небольших муниципальных образований, являющихся собственниками очистных сооружений. Поэтому, на наш взгляд, актуальной задачей остается поиск не только наиболее эффективных способов аэрации и перемешивания жидкости, но также поиск наиболее экономичных и конструктивно не сложных решений важных экологических проблем.

Цель настоящей работы — изучение возможности применения экономически выгодных перемешивающих устройств, не требующих дополнительных энергозатрат, но при этом позволяющих улучшить гидродинамическую обстановку в головной части аэротенка-вытеснителя, используя для этого оригинальное устройство ввода сточной жидкости в первый коридор уже действующего аэротенка.

Испытание перемешивающего устройства, проведенное в лабораторных условиях<sup>2</sup>, подтвердило возможность использования данного устройства в натурных условиях. Для определения основных параметров устройства с целью практического применения его в реальном аэротенке-вытеснителе был произведен примерный расчет исходя из натурных расходов сточных вод и размеров сооружения.

С учетом изложенного был рассмотрен действующий двухкоридорный аэротенк-вытеснитель с длиной коридора 75 м. Поток сточных вод средним расходом 20–30 тыс. м<sup>3</sup>/сут (т.е. порядка 1 тыс. м<sup>3</sup>/ч) поступал в аэротенк из трубы в затопленное пространство на расстоянии примерно 0,5 м от дна сооружения и 17,0 м от торцевой стены аэротенка. Кинетическая энергия струи сточных вод, выходящей из выпускной трубы, расходовалась не на перемешивание компонентов, а практически на удар о стенку аэротенка с образованием четырех потоков движения сточных вод в разных направлениях. При этом ни один из четырех потоков не совпадал с направлением движения жидкости от воздействия пристенно расположенных аэраторов (рис. 1, а). Это отрицательно влияло на эффектив-

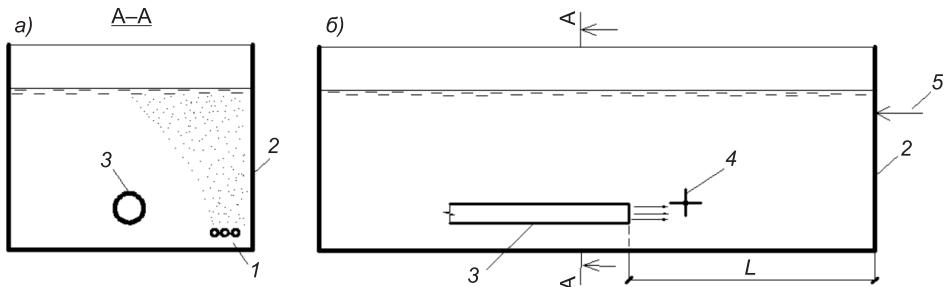


Рис. 1. Коридор аэротенка-вытеснителя

1 — аэраторы (трехрядное одностороннее пристенное размещение); 2 — первый коридор аэротенка-вытеснителя; 3 — устройство для впуска сточных вод; 4 — перемешивающее устройство; 5 — поставка активного ила; L — расстояние от торца впускной трубы до торцевой стенки аэротенка

<sup>1</sup> Казаков В.Д., Пельменёва Н.Д. Исследование влияния схемы размещения аэраторов на основные параметры и эффективность работы действующего аэротенка-вытеснителя // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 6. С. 71–78.

<sup>2</sup> Казаков В.Д., Пельменёва Н.Д. Испытание гидродинамического перемешивающего устройства в лабораторных условиях // Изв. вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2011. № 1. С. 54–59.

ность работы аэротенка-вытеснителя, где подача сточных вод и активного ила сосредоточена в двух точках первого коридора, а не распределена по всей длине сооружения, поэтому очень важно организовать процесс перемешивания в этом участке аэротенка. То есть с точки зрения оптимизации гидродинамического режима сооружения необходимо создать условия более интенсивного перемешивания в головной части сооружения всех компонентов, участвующих в биологической очистке. Для решения данной задачи можно в голове аэротенка разместить более мощную систему аэрации или добавить 2–3 нитки аэраторов к уже существующей «пристеночной» системе. И тот и другой вариант потребует кроме реконструкции обязательного увеличения расхода воздуха (электроэнергии), а также других эксплуатационных затрат. В нашем случае предлагалось рассмотреть возможность использования инерционного гидродинамического перемешивателя (вертушки), не требующего реконструкции системы аэрации аэротенка-вытеснителя и дополнительных затрат электроэнергии, но использующего при этом для своего вращения энергию самого потока поступающей в аэротенк жидкости (см. рис. 1, б). Это устройство представляло собой четырехлопастную мешалку с прямоугольными лопастями. Количество лопастей могло изменяться в зависимости от условий процесса, а мешалка (ИГП) могла устанавливаться специальным крепежом к стенкам или к дну внутри аэротенка, а также вывешиваться сверху в зависимости от конструкции аэротенка и места расположения выпускной трубы. Действие ИГП происходило следующим образом.

Поток сточной жидкости, выходя из выпускной трубы (см. рис. 1, б) и ударяясь в нижнюю лопасть мешалки, заставляет ее поворачиваться вокруг своей оси. Кинетическая энергия потока затрачивается на сдвиг лопастей мешалки с места (режим трогания) и затем на поддержку режима вращения. Из литературы<sup>3</sup> известно, что сила сопротивления движению тела в жидкости зависит от многих факторов, таких как форма, размеры тела, скорость движения, плотность жидкости, и может быть определена из выражения:

$$F = \xi S \frac{U^2 \gamma}{2g}. \quad (1)$$

Здесь  $\xi$  — коэффициент сопротивления, зависящий от характера движения и геометрических форм тела;

$S$  — площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную направлению скорости движения;

$U$  — скорость движения тела в жидкости;

$\gamma$  — удельный вес жидкости;

$g$  — ускорение силы тяжести.

Рассмотрим затраты энергии лопасти мешалки на преодоление сил сопротивления жидкости, т.е. критерий мощности, необходимый для создания вращения. Представим схему мешалки следующим образом (рис. 2). Мешалка вращается с частотой  $n$  об./с.

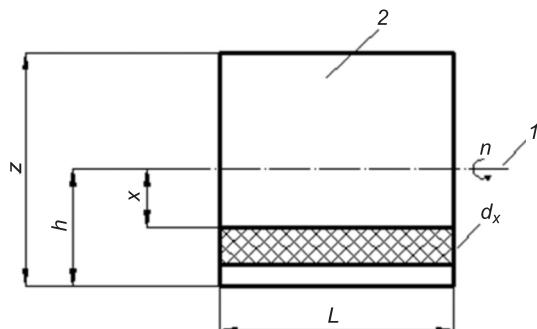


Рис. 2. Схема мешалки

1 — ось мешалки, 2 — лопасти мешалки

<sup>3</sup> Странк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками / Пер. с польск. под ред. И.А. Шупляка. Л.: Химия, 1975. 884 с.

Размер между краями лопастей —  $z$ , размер одной лопасти —  $h = z/2$ , длина лопасти —  $L$ . Выделим элементарную площадку лопасти  $dx$  на расстоянии  $x$  от оси мешалки.

Энергию, затрачиваемую лопастью мешалки на преодоление сопротивления жидкости, запишем в виде

$$dE = dFU, \quad (2)$$

или с учетом выражения (1), а также зная, что  $U = 2\pi n x$ , получим формулу затрат энергии на преодоление сопротивления

$$dE = \frac{(2\pi n x)^3}{2} \rho \xi L dx. \quad (3)$$

Проинтегрируем выражение (3) с обеих сторон:

$$\int_0^{E_0} dE = \int_0^h \frac{(2\pi n x)^3}{2} \rho \xi L dx. \quad (4)$$

После интегрирования в пределах от 0 до  $h$  и заменяя  $h = \frac{z}{2}$ , а также подставляя  $a = 1,93 \frac{L}{z}$ , окончательно будем иметь выражение затрат энергии на преодоление сил сопротивления жидкости:

$$E_0 = a \xi n^3 z^5 \rho. \quad (5)$$

Для определения потерь мощности на инерцию жидкости рассмотрим снова элементарный участок лопасти  $dx$  (см. рис. 2). Обозначим энергию, сообщаемую этим участком элементарной массе жидкости  $dm$ , в следующем виде:

$$dE_1 = \frac{dm U^2}{2}. \quad (6)$$

Здесь элементарная масса жидкости  $dm$ , захватываемая элементом лопасти мешалки в единицу времени, может быть найдена из выражения

$$dm = \frac{dQ}{g} = \frac{L dx U \gamma}{g}. \quad (7)$$

Заменим в выражении (7)  $\rho = \gamma / g$ ,  $U = 2\pi n x$  и подставим результат в формулу (6):

$$dE_1 = L \rho \frac{(2\pi n)^3}{2} x^3 dx. \quad (8)$$

Отсюда после интегрирования и вводя замены  $h = \frac{z}{2}$  и  $a = 1,93 \frac{L}{z}$ , окончательно будем иметь:

$$E_1 = a \rho n^3 z^5. \quad (9)$$

Тогда общие затраты энергии на преодоление инерционных сил и сил сопротивления жидкости, пренебрегая трением вращения, можно найти из выражений (5) и (9), а именно:

$$\sum E = E_0 + E_1 = a \xi n^3 z^5 \rho + a n^3 z^5 \rho = a n^3 z^5 \rho (\xi + 1). \quad (10)$$

Следовательно, для разных типов наиболее распространенных мешалок<sup>4</sup> с учетом изменения коэффициента сопротивления в диапазоне  $\xi = 0,5 \div 2$  пусковое значение мощности для этих коэффициентов будет находиться в пределах:

$$E_n = 1,5 E_0 \div 3 E_0, \quad (11)$$

или обычно для маловязких жидкостей принято считать<sup>3, 4</sup>

$$E_n = E_0 \div 1,5 E_0. \quad (12)$$

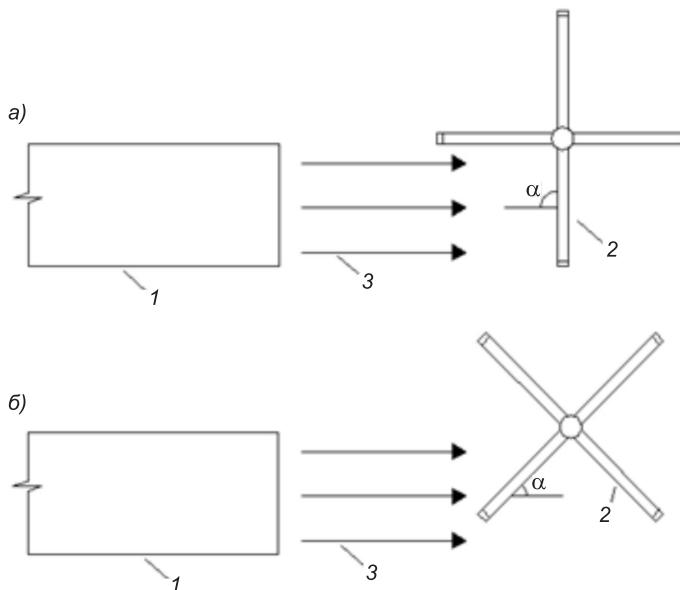
Тогда с учетом принятых рассуждений в первом приближении

$$E_n = C a n^3 z^5 \rho. \quad (13)$$

Здесь показатель  $C$  определяется в зависимости от конструктивных особенностей, типа мешалки, а также от соотношения длины лопасти к диаметру вращения мешалки<sup>5</sup>. Обычно он вычисляется по таблицам.

Для реального аэротенка-вытеснителя суточный расход сточных вод поступает в аэротенк через трубу  $D = 0,6$  м в объеме от 20 тыс. до 30 тыс. м<sup>3</sup>/сут. Можно принять среднесуточный расход примерно 25 тыс. м<sup>3</sup>/сут или 0,29 м<sup>3</sup>/с, а площадь сечения трубы  $\omega = 0,28$  м<sup>2</sup>. Тогда средняя скорость потока из трубы  $v = Q / \omega = 1,03$  м/с. Введем численные значения для всех членов выражения (13) —  $C = 2,3$ ;  $a = 1,81 L/z$ ;  $L = 1,5$  м;  $z = 0,8$  м;  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $n = 0,2$  об./с и вычислим пусковое значение затрат энергии для данной мешалки и данного аэротенка:

$$E_n = 19,98 \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}. \quad (14)$$



*Rис. 3. Схема давления потока жидкости на лопасть мешалки*

1 — выпускная труба, 2 — лопасть мешалки, 3 — направление движения потока жидкости,  $\alpha$  — угол между плоскостью лопасти и линией действия струи

<sup>4</sup> Васильцов Э.А., Ушаков В.Г. Аппараты для перемешивания жидких сред. Л.: Машиностроение, 1978. 271 с.

<sup>5</sup> Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика. М.: Стройиздат, 1975. 323 с.

Чтобы определить возможность вращения предложенного инерционного гидродинамического перемешивателя (ИГП), необходимо найти энергию давления потока сточной жидкости, выходящего из выпускной трубы и ударяющего в лопасти мешалки (рис. 3).

Сила вытекающей из трубы в аэротенк жидкости оказывает давление на лопасть и может быть представлена в виде<sup>3, 4</sup>

$$F = \rho Q U \sin \alpha, \quad (15)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости,

$Q$  — массовый расход жидкости,

$U$  — скорость движения струи.

Согласно принятой схеме (см. рис. 3, *a*)  $\sin \alpha = 90^\circ$ . Если лопасть мешалки будет двигаться в направлении движения струи с линейной скоростью  $u$ , то мощность давления струи на лопасть мешалки получим в виде

$$N = F u = \rho Q (U - u) u. \quad (16)$$

Найдем скорость движения лопасти мешалки, при которой мощность давления струи будет максимальной:

$$N_{\max} = \rho \cdot Q \left( U - \frac{U}{2} \right) \cdot \frac{U}{2} = \rho \cdot Q \cdot \frac{U^2}{4}. \quad (17)$$

Оценим полученное выражение с учетом реальных показателей аэротенка-вытеснителя и принятых выше размеров лопасти мешалки. Вычислим максимальную мощность давления струи на лопасть, которая движется под действием этой струи:

$$N_{\max} = 1000 \cdot 0,29 \cdot \frac{1,06}{2} = 76,85 \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}. \quad (18)$$

Определенный интерес представляет случай, когда струя имеет размеры значительно меньше, чем высота лопасти мешалки, и при ударе с большой скоростью о наклонную лопасть ( $\alpha \neq 90^\circ$ ) может отразиться от лопасти и тем самым создать дополнительное сопротивление движению соседней (набегающей) лопасти мешалки. При небольших скоростях движения струя, скорее всего, будет растекаться вверх и вниз по лопасти от точки удара.

В нашем случае рассматриваются небольшие скорости потока жидкости. Кроме того, принятые схема размещения и размеры высоты лопасти мешалки, близкие диаметру выпускной трубы, создают условия, при которых струя как бы постепенно набегает на наклонную плоскость лопасти мешалки, не создавая значительного противодавления соседней лопасти (см. рис. 3, *b*). Поэтому, не ставя целью найти точное решение не очень простой задачи и стремясь произвести оценочный расчет, позволяющий выбрать конструктивные параметры рассматриваемого устройства, считаем возможным пренебречь возникающим дополнительным сопротивлением. В то же время сила давления потока жидкости на наклонную лопасть будет меньше, чем сила потока при  $\alpha \neq 90^\circ$ . Следовательно, минимальная мощность давления струи при  $\alpha \neq 45^\circ$  будет на 30 % меньше полученной в выражении (18)

$$N_{\min} = 54,33 \text{ кг} \cdot \text{м} / \text{с}. \quad (19)$$

Сравнение результатов выражений (14) и (18), (19) показывает, что не только максимальная, но и минимальная мощность давления струи на лопасть мешалки превышает значение пусковой мощности потерь на инерцию и сопротивление жидкости. Этого вполне достаточно, чтобы стронуть мешалку с места, так как пусковые затраты обычно в 1,5–2 раза превышают потери мощности на сопротивление жидкости в процессе вращения мешалки.

Таким образом, предложенная примерная модель расчета позволяет определять параметры инерционного гидродинамического перемешивателя для реальных конкретных характеристик аэротенка-вытеснителя. Кроме того, по результатам экспериментальных исследований перемешивающего устройства авторами настоящей работы получен патент<sup>6</sup>.

**Выводы.** 1. Результаты исследований показали, что одним из наиболее важных мест для аэротенка-вытеснителя является зона ввода компонентов биологической очистки, где наблюдается дефицит кислорода и недостаток интенсивности взаимодействия субстрата загрязнений и активного ила.

2. Для решения указанной проблемы предложено бесприводное устройство — инерционный гидродинамический перемешиватель.

3. Разработана примерная модель расчета основных параметров устройства.

4. Предложенное в данной работе устройство может быть использовано в целях перемешивания и в других технологических схемах и сооружениях, позволяющих создавать струйные потоки.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Яковлев, С.В. Биологическая очистка производственных сточных вод. Процессы, аппараты и сооружения [Текст] / С.В. Яковлев, И.В. Скирдов, В.Н. Швецов. — М. : Стройиздат, 1985. — 208 с.
2. Попкович, Г.С. Системы аэрации сточных вод [Текст] / Г.С. Попкович, Б.Н. Репин. — М. : Стройиздат, 1986. — 136 с.
3. Воронов, В.Ю. Струйная аэрация [Текст] / В.Ю. Воронов, В.Д. Казаков, М.Ю. Толстой. — М. : Изд-во АСВ, 2007. — 216 с.
4. Frauendorf, Gunter. Использование мешалок с погружными электродвигателями в аэротенках с целью экономии затрат [Текст] / Gunter Frauendorf. Tauchmotor-Ruhrwerke zur wirtschaftlichen Stromungsbildung in Belebungsanlagen // KA. — Wasserwirt, Abwasser, Abfall. — № 11. — С. 1634–1636.

**КАЗАКОВ Вячеслав Дмитриевич, канд. физ.-мат. наук; E-mail: kazakov@istu.edu**  
Национальный Исследовательский Иркутский Государственный Технический Университет

**ПЕЛЬМЕНЁВА Наталья Дмитриевна, доц.; E-mail: pel@istu.edu**  
Национальный Исследовательский Иркутский Государственный Технический Университет

Получено после доработки 19.03.12

**Kazakov Vyacheslav Dmitrievich**, candidate of physical and mathematical sciences; E-mail: kazakov@istu.edu, National Research Irkutsk State Technical University, Russia  
**Pelmeneva Natalia Dmitrievna**, assistant professor; E-mail: pel@istu.edu, National Research Irkutsk State Technical University, Russia

<sup>6</sup> Пат. RU № 95270 МПК B 01 F 7/02. Самопреремешивающее устройство / В.Д. Казаков, М.Ю. Толстой, Н.Д. Пельменёва; Опубл. 27.06.2010 г., Бюл. № 18, 27.11.2008 г.

## **SAMPLE CALCULATION OF THE DEVICE FOR MIXING OF SEWAGE IN HEAD OF AEROTANK-PROPELLANT**

The motion of fluid flows in the head of the aerotank-propellant is examined. We propose an approximate calculation of the basic parameters of the mixing device (the inertial hydrodynamic stirrer), showing the possibility to intensify the process of mixing of sewage and sludge at the aerotank entrance, as well as to improve the hydrodynamic environment of the double corridor aerotanks without additional reconstruction of the one- or two- sided pipe systems of aeration. The proposed layout of the device allows the use of the flux energy of effluent entering the aerotank for additional mixing of all components of biological treatment.

**K e y w o r d s:** sewage purification, aerotank-displacer, hydrodynamics of liquid flows, mixing device.

### REFERENCES

1. Yakovlev, S.V. Biological Treatment of Process Sewage Water. Processes, Appliances and Constructions [Text] / S.V. Yakovlev, I.V. Skirdov, V.N. Shvetsov. — M. : Stroyizdat, 1985. — 208 p.
  2. Popkovich, G.S. Systems of Sewage Aeration [Text] / G.S. Popkovich, B.N. Repin. — M. : Stroyizdat, 1986. — 136 p.
  3. Voronov, V.Yu. Jet Aeration. Scientific Publishing [Text] / V.Yu. Voronov, V.D. Kazakov, M.Yu. Tolstoy. — M. : Published by ASV, 2007. — 216 p.
  4. Frauendorf, Gunter. Use of churn mixers with submersible motors in aerotankes for the purpose of savings on costs [Text] / Gunter Frauendorf. Tauchmotor-Ruhrwerke zur wirtschaftlichen Stromungsbildung in Belebungsanlagen // KA. — Wasserwirt, Abwasser, Abfall. — 2000. — N 11. — P. 1634–1636.
-

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.542.001.24

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

## ПРИНЦИПИАЛЬНЫЕ СХЕМЫ БЕСКЛАПАННЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УДАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ С ВОЗДУХОПОДВОДЯЩЕЙ ТРУБКОЙ И ИХ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Рассмотрены физико-математические описания пневмоударных механизмов бесклапанного типа с центральной трубкой воздухопровода и инерционным стержнем в системе воздухораспределения.

Ключевые слова: пневмоударный механизм, инерционный стержень, камера рабочего хода, камера атмосферного давления, камера сетевого давления, ударник, трубка воздухопровода.

Данная работа — продолжение аналитического обзора пневмоударных механизмов [1]. Отличительной особенностью механизмов от ранее рассмотренных [2, 3] является наличие центральной трубы воздухопровода, посредством которой сжатый воздух из сети поступает в камеру сетевого давления, исполняющую одновременно функции камеры холостого хода. Такие пневмоударные механизмы имеют простую форму корпуса, но обладают общим недостатком: диаметральные размеры стержня должны быть существенно большими диаметрального сечения трубы, что позволяет организовать со стороны камеры необходимый и достаточный по величине импульс давления воздуха для перемещения ударника в сторону камеры рабочего хода. При этом конструктивно обеспечивается сжатие отсеченного в камере воздуха практически на всем участке хода ударника, что обеспечивает противодавление только от «чистого» сжатия воздуха в камере, а выпуск воздуха из камеры сетевого давления осуществляется в конце холостого хода. Такое конструктивное решение обеспечивает расширение воздуха, потребляемого из сети, практически на всем участке движения ударника при рабочем ходе.

При моделировании рабочего процесса рациональное значение координаты начала впуска воздуха в камеру рабочего хода может быть найдено с учетом назначения пневмоударного механизма или условия задания.

*Краткое описание принципиальной схемы механизма* базируется на патентных материалах. Так, пневмоударный механизм [4] устроен и работает следующим образом (рис. 1).

Сжатый воздух из сети по каналу АА<sub>1</sub> в трубке 1 постоянно поступает в камеру Б сетевого давления (она же камера холостого хода), откуда

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

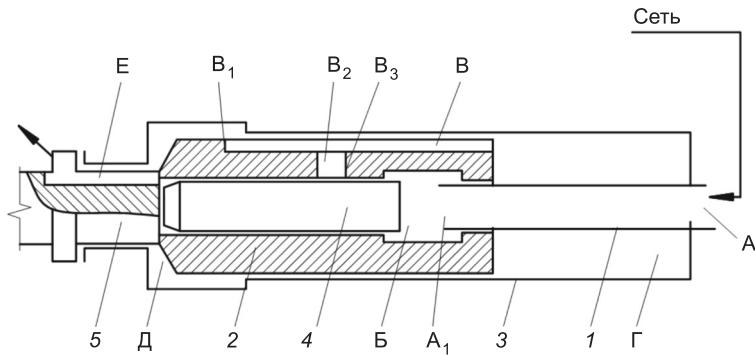


Рис. 1. Принципиальная схема пневмоударного механизма [4]

в зависимости от положения ударника 2 по его каналу В<sub>3</sub>В<sub>2</sub> и каналу-пазу В<sub>1</sub>В в управляемую камеру Г рабочего хода в цилиндре 3. Стержень 4 в ударнике давлением воздуха со стороны камеры Б постоянно прижат к инструменту 5. Камера Д атмосферного давления через канал-паз Е в инструменте постоянно сообщена с окружающим пространством. Опорожнение камеры осуществляется через канал-паз ВВ<sub>1</sub>, камеру Д и канал-паз Е. Под действием разности силовых импульсов со стороны камер Д, Б и Г ударник совершает возвратно-поступательное движение и наносит удары по инструменту.

К недостаткам механизма [4] следует отнести: жесткое закрепление трубы 1 воздухопровода относительно корпуса 3 и наличие ее посадки на ударнике 2, что может вызвать перекосы трубы и ее поломку; выполнение канала-паза В<sub>1</sub>В, который создает на боковой поверхности ударника по всей его длине концентраторы напряжений, отрицательно влияющие на прочность ударника и его ресурс; конструктивно и технически сложен канал ВВ<sub>1</sub> выпуска отработавшего воздуха из камеры Г; камера Д (атмосферного давления) не участвует в создании силового импульса давления воздуха при холостом ходе ударника.

К положительным сторонам конструкции следует отнести: камера атмосферного давления не создает сил противодавления, тормозящих ударник при рабочем ходе, поскольку в ней поддерживается давление, близкое по величине атмосферному; рабочий инструмент постоянно поджат к обрабатываемой среде силовым импульсом давления со стороны камеры сетевого давления и своей массой, которая может быть значительной, например, у механизмов с энергией удара более 1000 Дж; инструмент при отскоке от обрабатываемой сферы затормаживается стержнем и корпусу передается незначительный по величине импульс, который может не вызывать движения корпуса от инструмента и при этом инструмент не будет выталкиваться обрабатываемой средой, а следовательно, не потребуется затрат энергии удара на его возвращение в положение, соответствующее после соударения с ударником в предыдущем цикле.

*Физико-математическое описание рабочего процесса пневмоударного механизма.* Согласно обозначениям на рис. 1, рабочий процесс механизма описывается следующими уравнениями, увязанными между собой для камер Д, Б и Г баро- и термодинамическими, баромеханическими зависимостями.

Бародинамическая составляющая:

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

термодинамическая составляющая:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_{\Delta}}{dt} = \frac{\theta_{\Delta}}{p_{\Delta}(V_{\Delta} + x_y(S_y - S_c))} \times \\ \times \left[ W(\omega_{\Delta}(x_y) \varphi_{\Delta} \Omega_{\Delta} - \omega_{ED} \varphi_{ED} \Omega_{ED}) - (k-1)p_{\Delta} \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_c) \right], \\ \frac{d\theta_B}{dt} = \frac{\theta_B}{p_B(V_B + x_y(S_c - S_T))} \times \\ \times \left[ W(\omega_{BA} \varphi_{BA} \Omega_{BA} - \omega_{GB}(x_y) \varphi_{GB} \Omega_{GB}) - (k-1)p_B \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_c - S_T) \right], \\ \frac{d\theta_{\Gamma}}{dt} = \frac{\theta_{\Gamma}}{p_{\Gamma}(V_{\Gamma} - x_y(S_y - S_T))} \times \\ \times \left[ W(\omega_{GB}(x_y) \varphi_{GB} \Omega_{GB} - \omega_{\Delta}(x_y) \varphi_{\Delta} \Omega_{\Delta}) + (k-1)p_{\Gamma} \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_T) \right]; \end{array} \right. \quad (2)$$

баромеханическая составляющая:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 x_y}{dt^2} = \frac{p_{\Delta}(S_y - S_c) - p_B(S_y - S_T) + p_{\Gamma}(S_y - S_T)}{m_y} \quad \text{при } x_y > 0, \\ \left( \frac{dx_y}{dt} \right) = -k_y \left( \frac{dx_y}{dt} \right)_y \quad \text{при } x_y \leq 0, \\ \frac{d^2 x_K}{dt^2} = \frac{p_{\Delta}(S_y - S_c) - p_B(S_c - S_T) + p_{\Gamma}(S_y - S_T) - F_H}{m_K} \quad \text{при } x_K > 0, \\ \left( \frac{dx_K}{dt} \right) = -k_K \left( \frac{dx_K}{dt} \right)_y \quad \text{при } x_K \leq 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

Обозначения, приведенные в (1), (2), (3):

$V_B$ ,  $V_{\Gamma}$ ,  $V_{\Delta}$  — объемы камер сетевого давления (холостого хода), рабочего хода и атмосферного давления;

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

$\omega_{BA}$ ,  $\omega_{GB}$ ,  $\omega_{\Delta}$ ,  $\omega_{ED}$  — площади проходных сечений каналов (дресселей) впуска в камеру сетевого давления (холостого хода), рабочего хода, атмосферного давления и атмосферу;

$\varphi_{BA}$ ,  $\varphi_{GB}$ ,  $\varphi_{\Delta}$ ,  $\varphi_{ED}$  — бародинамические функции воздуха для пропуска через площади проходных сечений  $\omega_{BA}$ ,  $\omega_{GB}$ ,  $\omega_{\Delta}$ ,  $\omega_{ED}$ ;

$\theta_B$ ,  $\theta_G$ ,  $\theta_D$  — температура воздуха в камерах с объемами  $V_B$ ,  $V_G$ ,  $V_D$ ;  
 $\Omega_{BA}$ ,  $\Omega_{GB}$ ,  $\Omega_{DG}$ ,  $\Omega_{ED}$  — термодинамические функции воздуха для пропуска  
 через площади проходных сечений,  $\omega_{BA}$ ,  $\omega_{GB}$ ,  $\omega_{DG}$ ,  $\omega_{ED}$ ;

$W = \left[ \frac{2kR}{(k-1)} \right]^{\frac{1}{2}}$ , где  $k$  — показатель процесса в рабочих камерах,  $R$  — газо-  
 вая постоянная;

$x_k$ ,  $x_y$  — перемещение корпуса-цилиндра и ударника;

$m_k$ ,  $m_y$  — массы корпуса-цилиндра и ударника;

$S_T$ ,  $S_y$ ,  $S_c$  — площади диаметральных сечений трубы, ударника, стержня;  
 $F_H$  — усилие нажатия на корпус-цилиндр;

$k_y$ ,  $k_k$  — коэффициенты отскока ударника и корпуса-цилиндра от хвосто-  
 вика инструмента;

$t$  — текущее время.

Рабочие площади со стороны камер Г, Б и Д:  $S_G = S_y - S_T$ ,  
 $S_B = S_c - S_T$ ,  $S_D = S_y - S_c$ .

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

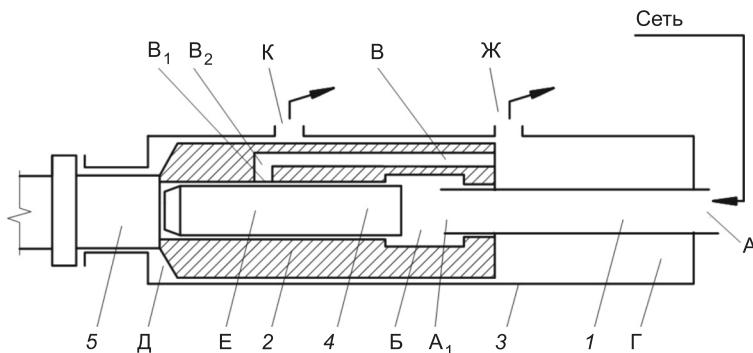


Рис. 2. Принципиальная схема пневмоударного механизма [5]

В системе уравнений, описывающих рабочий процесс пневмоударно-  
 го механизма, рассматриваемого типа процессы перетечек и утечек опу-  
 щены. Возможные обратные течения учтены зависимостями (4) и (5). Со-  
 гласно зависимостям Сен-Венана–Вантцеля функции имеют одинаковую  
 форму записи и могут иметь вид

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

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

Аналогична запись для функций  $\Omega_{ij}$  и  $\Omega_{ji}$ :

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

При рассмотрении рабочего процесса пневмоударного механизма, представленного схемой на рис. 1, принятые допущения о возможности прямых и обратных течений воздуха по дросселям (каналам) при наличии соответствующих посадок между контактирующими подвижными деталями: ударник-корпус (цилиндр); ударник-стержень, ударник-трубка, корпус (букса)-хвостовик инструмента.

Теоретический и практический интерес представляют рациональные значения соотношений между объемами камер, проходными сечениями дросселей (каналов) впуска-выпуска и координатами их расположения. В данной работе ограничения для функции  $\omega_i(x_y)$  для конкретных случаев опускаются и могут по форме записи отличаться от представлений [2, 3].

Допущения и ограничения для бародинамических, термодинамических и баромеханических уравнений, описывающих рабочий процесс пневматического ударного механизма [4], широко известны из более ранних публикаций, например, [2, 3]. Принимая во внимание рекомендации по публикуемому объему, описания других механизмов этой группы в данной работе опущены. Наличие индексов в обозначениях параметров дает полное представление о направлениях впуска и перепуска потоков воздуха между рабочими камерами и их выпуска в атмосферу.

Пневмоударный механизм [5] устроен и работает следующим образом (см. рис. 2).

Сжатый воздух из сети по каналу АА<sub>1</sub> в трубке 1 постоянно поступает в камеру Б сетевого давления (она же камера холостого хода), откуда в зависимости от положения ударника 2 по его каналу В<sub>1</sub>В<sub>2</sub>В управляемую камеру Г рабочего хода в цилиндре 3. Стержень 4 в ударнике давлением воздуха со стороны камеры Б постоянно прижат к инструменту 5. Камера Д пневматического буфера периодически сообщается через выпускной канал Е с окружающим пространством.

Опорожнение камеры Г осуществляется через выпускной канал Ж в цилиндре.

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

К недостаткам механизма [5] следует отнести: жесткое закрепление трубки 1 воздуховода относительно корпуса 3 и наличие ее посадки на ударнике, что может вызвать перекосы трубы и ее поломку; камера пневматического буфера создает противодавление и торможение ударника перед соударением с инструментом.

К положительным сторонам конструкции следует отнести: рабочий инструмент постоянно поджат к обрабатываемой среде силовым импульсом давления со стороны камеры сетевого давления и своей массой, которая может быть значительной, например, у механизмов с энергией удара более 1000 Дж: инструмент при отскоке от обрабатываемой среды затор-

маживается стержнем и корпусу передается незначительный по величине импульс, который может не вызывать движения корпуса от инструмента и при этом инструмент не будет выталкиваться обрабатываемой средой, а следовательно, не потребуется затрат энергии удара на его возвращение в положение, соответствующее после соударения с ударником в предыдущем цикле.

*Физико-математическое описание рабочего процесса пневмоударного механизма.* Согласно обозначениям на рис. 2, рабочий процесс механизма описывается следующими уравнениями, увязанными между собой для камер Д, Б и Г баро- и термодинамическими, баромеханическими зависимостями.

Бародинамическая составляющая:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp_{\Delta}}{dt} = \frac{k}{V_{\Delta} + x_y(S_y - S_c)} \times \\ \times \left[ W(-\omega_{\Delta E}(x_y)\varphi_{\Delta E} + \omega_{E \Delta}(x_y)\varphi_{E \Delta}) - p_{\Delta} \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_c) \right], \\ \frac{dp_B}{dt} = \frac{k}{V_B + x_y(S_c - S_T)} \times \\ \times \left[ W(\omega_{B A}\varphi_{B A} - \omega_{G B}(x_y)\varphi_{G B}) - p_B \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_c - S_T) \right], \\ \frac{dp_G}{dt} = \frac{k}{V_G - x_y(S_y - S_T)} \times \\ \times \left[ W(\omega_{G B}(x_y)\varphi_{G B} - \omega_{J G}(x_y)\varphi_{J G}) + p_G \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_T) \right]; \end{array} \right. \quad (6)$$

термодинамическая составляющая:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_{\Delta}}{dt} = \frac{\theta_{\Delta}}{p_{\Delta}(V_{\Delta} + x_y(S_y - S_c))} \times \\ \times \left[ W(-\omega_{\Delta E}(x_y)\varphi_{\Delta E}\Omega_{\Delta E} + \omega_{E \Delta}(x_y)\varphi_{E \Delta}\Omega_{E \Delta}) - (k-1)p_{\Delta} \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_c) \right], \\ \frac{d\theta_B}{dt} = \frac{\theta_B}{p_B(V_B + x_y(S_c - S_T))} \times \\ \times \left[ W(\omega_{B A}\varphi_{B A}\Omega_{B A} - \omega_{G B}(x_y)\varphi_{G B}\Omega_{G B}) - (k-1)p_B \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_c - S_T) \right], \\ \frac{d\theta_G}{dt} = \frac{\theta_G}{p_G(V_G - x_y(S_y - S_T))} \times \\ \times \left[ W(\omega_{G B}(x_y)\varphi_{G B}\Omega_{G B} - \omega_{J G}(x_y)\varphi_{J G}\Omega_{J G}) + (k-1)p_G \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_T) \right]; \end{array} \right. \quad (7)$$

баромеханическая составляющая:

$$\begin{cases} \frac{d^2x_y}{dt^2} = \frac{p_{\Delta}(S_y - S_c) - p_B(S_c - S_T) - p_G(S_y - S_T)}{m_y} & \text{при } x_y > 0, \\ \left(\frac{dx_y}{dt}\right)_0 = -k_y \left(\frac{dx_y}{dt}\right)_y & \text{при } x_y \leq 0, \\ \frac{d^2x_K}{dt^2} = \frac{p_{\Delta}(S_y - S_c) - p_B(S_c - S_T) - p_G(S_y - S_T) - F_H}{m_K} & \text{при } x_K > 0, \\ \left(\frac{dx_K}{dt}\right)_0 = -k_K \left(\frac{dx_K}{dt}\right)_y & \text{при } x_K \leq 0. \end{cases} \quad (8)$$

Обозначения параметров и индексация в (6)–(8) аналогичны предыдущим.

Описания для допущений и ограничений по указанным ранее причинам здесь опущены.

Вариант пневмоударного механизма [5] на рис. 3 устроен и работает следующим образом.

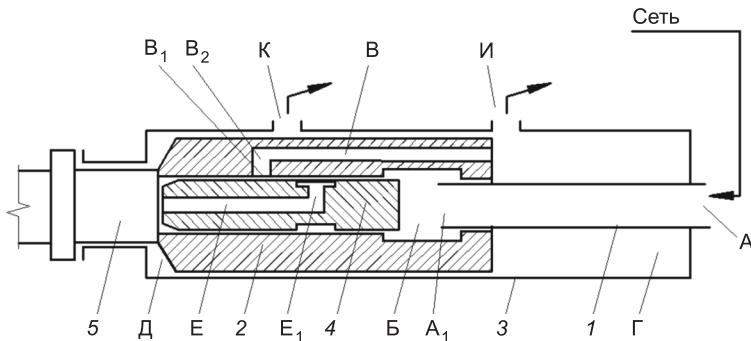


Рис. 3. Вариант принципиальной схемы пневмоударного механизма [5]

Сжатый воздух из сети по каналу АА<sub>1</sub> в трубке 1 постоянно поступает в камеру Б сетевого давления (она же камера холостого хода) в ударнике 2, откуда в зависимости от положения ударника по его каналу В<sub>2</sub>В в управляемую камеру Г рабочего хода в цилиндре 3. Стержень 4 в ударнике давлением воздуха со стороны камеры Б постоянно прижат к инструменту 5. Канал Е с кольцевой выточкой Е<sub>1</sub> в стержне периодически в зависимости от положения ударника сообщает камеру Г с управляемой камерой Д холостого хода.

Опорожнение камеры Г осуществляется через выпускной канал И, а камеру Д через канал К в цилиндре.

Под действием силового импульса со стороны камер Г, Б и Д ударник совершает возвратно-поступательное движение и наносит удары по инструменту.

К недостаткам варианта исполнения механизма [5] следует отнести: конструктивную и техническую сложность перепуска воздуха между камерами Д и Г; жесткое закрепление трубы 1 относительно корпуса 3 и наличие ее посадки на ударнике 2, что может вызывать перекосы трубы и ее тормозящее воздействие на ударник, а также ее поломку; большее противодавление воздуха со стороны камеры Д, которая подпитывается воздухом из камеры Г посредством каналов ВВ<sub>2</sub> и Е<sub>1</sub>Е.

Положительными свойствами конструктивного исполнения механизма являются: постоянное поджатие к обрабатываемой среде рабочего инструмента 5 стержнем 4 посредством давления воздуха со стороны камеры Б, что снижает влияние величины импульса отскока инструмента от обрабатываемой среды и на столько же сохраняет импульс удара, передаваемого среде; конструктивная простота средств выпуска отработавшего воздуха из камер Г и Д, обеспечиваемая меньшими местными сопротивлениями воздуха на выпуске.

В соответствии с обозначениями на рис. 3 и обозначениями параметров при описании рабочего процесса пневмоударного механизма его уравнения будут иметь следующий вид.

Бародинамическая составляющая:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dp_{\Delta}}{dt} = \frac{k}{V_{\Delta} + x_y(S_y - S_c)} \times \\ \times \left[ W(-\omega_{\Delta K}(x_y)\varphi_{\Delta K} + \omega_{\Delta \Gamma}(x_y)\varphi_{\Delta \Gamma} + \omega_{K \Delta}(x_y)\varphi_{K \Delta}) - p_{\Delta} \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_c) \right], \\ \frac{dp_B}{dt} = \frac{k}{V_B + x_y(S_c - S_T)} \left[ W(\omega_{B A}\varphi_{B A} - \omega_{\Gamma B}(x_y)\varphi_{\Gamma B}) - p_B \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_c - S_T) \right], \\ \frac{dp_{\Gamma}}{dt} = \frac{k}{V_{\Gamma} - x_y(S_y - S_T)} \times \\ \times \left[ W(\omega_{\Gamma B}(x_y)\varphi_{\Gamma B} - \omega_{I \Gamma}(x_y)\varphi_{I \Gamma}) + p_{\Gamma} \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_T) \right]; \end{array} \right. \quad (9)$$

термодинамическая составляющая:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\theta_{\Delta}}{dt} = \frac{\theta_{\Delta}}{P_{\Delta}(V_{\Delta} + x_y(S_y - S_c))} \times \\ \times \left[ W(-\omega_{\Delta K}(x_y)\varphi_{\Delta K}\Omega_{\Delta K} + \omega_{\Delta \Gamma}(x_y)\varphi_{\Delta \Gamma}\Omega_{\Delta \Gamma} + \right. \\ \left. + \omega_{K \Delta}(x_y)\varphi_{K \Delta}\Omega_{K \Delta}) - (k-1)p_{\Delta} \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_c) \right], \\ \frac{d\theta_B}{dt} = \frac{\theta_B}{p_B(V_B + x_y(S_c - S_T))} \times \\ \times \left[ W(\omega_{B A}(x_y)\varphi_{B A}\Omega_{B A} - \omega_{B B}(x_y)\varphi_{B B}\Omega_{B B} - \right. \\ \left. - \omega_{\Gamma B}(x_y)\varphi_{\Gamma B}\Omega_{\Gamma B}) - (k-1)p_B \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_c - S_T) \right], \\ \frac{d\theta_{\Gamma}}{dt} = \frac{\theta_{\Gamma}}{p_{\Gamma}(V_{\Gamma} - x_y(S_y - S_T))} \times \\ \times \left[ W(\omega_{\Gamma B}(x_y)\varphi_{\Gamma B}\Omega_{\Gamma B} - \omega_{I \Gamma}(x_y)\varphi_{I \Gamma}\Omega_{I \Gamma}) + (k-1)p_{\Gamma} \left( \frac{dx_y}{dt} \right) (S_y - S_T) \right]; \end{array} \right. \quad (10)$$

баромеханическая составляющая:

$$\begin{cases} \frac{d^2x_y}{dt^2} = \frac{p_{\Delta}(S_y - S_c) - p_B(S_c - S_T) - p_T(S_y - S_T)}{m_y} & \text{при } x_y > 0, \\ \left(\frac{dx_y}{dt}\right)_0 = -k_y \left(\frac{dx_y}{dt}\right)_y & \text{при } x_y \leq 0, \\ \frac{d^2x_K}{dt^2} = \frac{p_{\Delta}(S_y - S_c) + p_B(S_c - S_T) - p_T(S_y - S_T) - F_H}{m_K} & \text{при } x_K > 0, \\ \left(\frac{dx_K}{dt}\right)_0 = -k_K \left(\frac{dx_K}{dt}\right)_y & \text{при } x_K \leq 0. \end{cases} \quad (11)$$

Для уравнений систем (9)–(11) обозначения параметров и их индексация сохраняют принятый ранее (1)–(8) физический смысл. В качестве общего результата приведенных описаний отметим, что наибольший интерес при моделировании рабочего процесса данной группы пневмоударных механизмов представляет установление геометрических соотношений, зависящих от назначения машины с тем или иным пневмоударным механизмом и от соответствующих энергетических характеристик выбранных базовых машин-носителей и компрессорного оборудования.

**Выводы.** 1. Уравнения, описывающие рабочий процесс бесклапанных пневматических ударных механизмов с воздухопроводящей трубкой, удобны по форме записи и позволяют ориентироваться и прогнозировать тот или иной результат моделирования рассмотренной группы и им подобных по конструкциям механизмов.

2. Графическое моделирование позволяет получить адекватность физико-математической и натурной моделей с использованием одинакового масштаба при заданных параметрах с выходом на искомый результат.

3. Пневматические ударные механизмы рассмотренной группы и им подобных по конструкциям с учетом их положительных качеств целесообразно применять практически для всех машин ударного действия, используемых в различных технологиях строительного производства.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А б р а м е н к о в, Э.А. Пневматические механизмы машин ударного действия: дробильные, струйные, беззолотниковые, бесклапанные [Текст] / Э.А. Абраменков, Д.Э. Абраменков : справ. пособие. — Новосибирск : Изд-во Новосиб. ун-та, 1993. — 430 с.
2. Д е д о в, А.С. Технология бестраншейной замены трубопроводов водоотведения [Текст] / А.С. Дедов, А.С. Мельникова, Н.А. Попов, О.В. Ткаченко, Д.Э. Абраменков // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 12. — С. 62–72.
3. А б р а м е н к о в, Д.Э. Классификация признаков и принципиальные конструктивные схемы пневмоударных механизмов строительных навесных молотов [Текст] / 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. 1138309 СССР. Пневматический молоток [Текст] / Э.А. Абраменков, Ж.Г. Мухин, Б.Г. Трегубов : Опубл. БИ 1985, № 5.
5. А.с. 1093802 СССР. Пневматическая машина ударного действия [Текст] / Э.А. Абраменков, Ж.Г. Мухин, Б.Г. Трегубов : Опубл. БИ 1984, № 19.

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, студ.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*КРУТИКОВ Евгений Игоревич, асп.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*МАЛЫШЕВА Юлия Эдуардовна, инженер НИС*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*МЕЛЬНИКОВА Анна Сергеевна, асп.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

Получено 30.03.12

**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**, 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

**Malysheva Yuliya Eduardovna**, engineer, 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 VALVELESS PNEUMATIC HAMMER MECHANISM WITH VOZDUHOPODVODYASCHEY TUBES AND THEIR PHYSICAL AND MATHEMATICAL DESCRIPTION**

The physical-mathematical description of the mechanisms of air percussion valveless tube type with a central duct and the core of an inertial system vozduhoraspredeleniya.

**Key words:** air percussion mechanism, delayed rod, chamber of the working stroke, the atmospheric pressure chamber, the chamber pressure mains, the drummer, the tube duct.

### REFERENCES

1. Abramenkov, E.A. Pneumatic Machinery Machines Impact the Action of Hold: Butterfly, Inkjet, Bezzolotnikovye, Valveless [Text] / E.A. Abramenkov, D.E. Abramenkov : Ref. benefits. — Novosibirsk : Publishing House of Novosibirsk. University, 1993. — 430 p.
2. Dedov, A.S. Technology trenchless pipe replacement wastewater [Text] / A.S. Dedov, A.S. Melnikova, N.A. Popov, O.V. Tkachenko, D.E. Abramenkov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 12. — P. 62–72.
3. Abramenkov, D.E. Classification of the principal structural features and mechanisms for building circuits mounted air percussion hammer [Text] / D.E. Abramenkov, A.S. Melnikova, A.S. Dedov, N.A. Popov, A.V. Gruzin, E.A. Abramenkov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2012. — N 1. — P. 92–100.
4. A.s. 1138309 USSR. The pneumatic hammer [Text] / E.A. Abramenkov, J.G. Mukhin, B.G. Tregubov : Publ. BI 1985, N 5.
5. A.s. 1093802 USSR. The pneumatic hammer machine [Text] / E.A. Abramenkov, J.G. Mukhin, B.G. Tregubov : Publ. BI 1984, N 19.

УДК 621.542.001.24

Д.Г. СУВОРОВ

## К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УПЛОТНЯЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ПОРШНЕВЫХ МАШИН

Разработка грунтоуплотняющего оборудования, включающего пневматическую машину в ручном или навесном исполнении, требует анализа и оптимизации значительного количества параметров, связанных с динамикой пневматической машины и свойствами уплотняемых грунтов. Часть из этих задач решается с учетом как статических, так и динамических свойств машин как объектов уплотнения.

Ключевые слова: пневматическая машина, грунт, уплотнение.

Проектирование грунтоуплотняющих машин с активными видами рабочего оборудования имеет несколько этапов, включающих специальные задачи, связанные с динамикой машин и теорией уплотнения грунта. Теоретические исследования ученых [1–4 и др.], опыт, накопленный фирмами по производству грунтоуплотняющего оборудования, средства вычислительной техники позволяют в настоящее время создавать высокоэффективные машины. В предлагаемой работе использованы также результаты, полученные автором при исследовании ручной пневматической трамбовки работоспособностью 35 Дж. Процесс проектирования оборудования ведется по этапам.

**1. Выбор базовой машины.** Основные параметры выбора — габариты машины, минимальные радиусы поворота, характеризующие маневренность, габариты маневра и грузоподъемность. Первые определяют возможность применения машины в стесненных условиях, а грузоподъемность — массу манипуляторной подвески с трамбователем. Исходными данными на этом этапе служат размеры прямолинейных проездов в свету, ширина равноширокого углового проезда, входная ширина углового проезда строительной площадки и масса трамбователя.

В последние годы наиболее перспективными машинами для создания оборудования, применяемого в строительстве при уплотнении грунтов обратной засыпки в стесненных условиях, являются мини-погрузчики.

Мини-погрузчики марки ПУМ-500...ПУМ-1250 (погрузчик универсальный малогабаритный) разработаны ОАО «Пневмостроймашина» и выпускаются ГУП ПО «Уралвагонзавод» и др. Машины имеют грузоподъемность от 0,5 до 1,250 т с двигателями мощностью 21...56 кВт. По своим технологическим и эксплуатационным качествам они во многом совместимы по работе с электрическими или пневматическими трамбовками. Трамбователи большей мощности могут быть выполнены на базе экскаваторов ЭО-3333, ЭО-2621, бульдозеров ДЗ-29, ДЗ-37 и погрузчиков с шарнирно сочлененной рамой ТО-18, ТО-30. Иностранные фирмы выпускают малогабаритные экскаваторы и землеройно-транспортные машины специально для работы в стесненных условиях. Грунтоуплотняющие машины могут быть созданы на базе универсальных малогабаритных землеройно-транспортных машин «Bobcat», имеющих грузоподъемность

от 272...1814 кг и габариты в пределах  $3000 \times 1400 \times 2000$ , мини-экскаваторов КН-055, КН-007.

Особенности технологии, условия работы машин для производства обратной засыпки позволяют сделать вывод о необходимости создания специального роботизированного шасси, снабженного системой автоматического управления на базе элементов микропроцессорной техники, совмещенной с АСУ манипулятором, т.е. строительного промышленного робота с грунтоуплотняющим рабочим органом.

**2. Расчет параметров пневмотрамбователя.** Рабочий технологический процесс пневмотрамбователя по физической основе близок как к трамбующим, так и к виброударным машинам. При разработке конструкций трамбующих машин основными расчетными параметрами являются генерируемый импульс  $S_r^i$ , удельный ударный и удельный предельный импульсы, установленные для грунтов, динамические характеристики грунта и статическое давление трамбующей плиты. Для виброударных машин — удельное статическое давление, частота ударов и величина возмущающей силы. Пневмотрамбователь может работать в различных режимах уплотнения — ударном с положительным и отрицательным усилами нажатия, ударно-статическом, ударном со значительным прониканием рабочего органа в грунт<sup>1</sup>.

В качестве расчетного примем ударный режим работы пневмотрамбователя, а особенности остальных режимов будем учитывать на отдельных этапах проектирования. Расчет параметров будем вести с учетом полученных экспериментальных результатов и аналитических зависимостей, а также обобщения известных положений теории грунтоуплотняющих машин.

*2.1. Обоснование технологических параметров.* Исходными данными для выбора и расчета процесса уплотнения являются тип и состояние грунта, определяемые содержанием глинистых частиц  $\Delta$ , %, и влажностью  $W$ , %; исходная плотность  $\rho_0$  и требуемая  $\rho_h$  относительно максимальной стандартной  $\rho_{dmax}$  или плотности целика грунта  $\rho_c$ , когда при обратных засыпках принимается  $\rho_h \approx \rho_c$ ; теоретическая производительность машины  $\Pi_t$ .

В теории уплотнения грунтов<sup>2</sup> принято глубину активной зоны или толщину уплотняемого слоя грунта выражать через размер меньшей стороны трамбующей плиты  $a$ . Принимая толщину уплотняемого слоя грунта  $h = \kappa_z \cdot a$  из формулы производительности, определяем

$$a = 0,065[\Pi_t / (K_\Sigma K_z f_\delta)]^{1/3}, \quad (1)$$

где  $\Pi_t$  — требуемая производительность трамбователя,  $m^3/\text{ч}$ ;

$K_\Sigma = K_\phi \cdot K_x \cdot K_s$  ( $K_\phi$  — коэффициент формы трамбующей плиты;  $K_x$  — коэффициент перекрытия проходов;  $K_s$  — коэффициент, учитывающий совершенство конструкции подвески-манипулятора и конфигурацию обслуживающей зоны);

$K_z$  — коэффициент, зависящий от типа грунта и удельного ударного импульса;

$f_\delta = f_\delta / n_\delta$  ( $f$  — частота ударов трамбователя,  $s^{-1}$ ;  $n_\delta$  — число ударов, необходимое для получения требуемой плотности грунта  $\rho_h$  обратной засыпки по всему слою уплотнения  $h$ ).

<sup>1</sup> Суворов Д.Г. Технологические качества бесшаблонных пневматических трамбователей // Изв. вузов. Строительство. 1997. № 4. С. 136–141.

<sup>2</sup> Доценко А.И., Пучков В.В., Буренюк М.Р. Определение производительности грунтоуплотняющих машин ударного действия // Строительные и дорожные машины. 1983. № 11. С. 14–15.

Коэффициент формы трамбующей плиты  $K_\phi = l/a$ , где  $l$  — длина плиты, м; для круглой формы плиты  $K_\phi = \pi/4$ .

Для оценки размера плиты  $a$  значение коэффициентов рекомендуется брать в следующих интервалах:  $K_x = 1\dots0,8$  с учетом влияния боковой деформации в грунтовом ядре под трамбующей плитой;  $K_y = 0,20\dots0,70$ ,  $K_z = 1,5\dots2,5$ .

Число ударов  $n_\delta$  предварительно примем 1...3, уточнив при дальнейшем расчете, а  $f$  назначим в зависимости от производительности в пределах 10...2 Гц. Меньшие значения для машин с большей производительностью.

*2.2. Для определения необходимой величины генерируемого импульса имеем соотношение*

$$S_r^i = (G_m \pm \Sigma F_h) / f. \quad (2)$$

Для реализации генерируемого импульса при выбранной частоте  $f$  сила тяжести  $G_m$  и сила нажатия  $\Sigma F_h$ , направленная по оси корпуса машины в вертикальном ее положении, должны иметь вполне определенные значения. Усилие нажатия имеет границы изменения, зависящие от ее конструктивных особенностей и массы. Так,  $+\Sigma F_h \leq G_m$  и  $-\Sigma F_h \leq F_{max}$  — усилия, при которых нарушается рабочий режим машины<sup>1</sup>. Усилие нажатия на корпус ручных машин не должно превышать 200 Н (ГОСТ 10211-76). Для пневмотрамбовок усилие, близкое к максимальному, приводит к быстрой утомляемости рабочего и, как показали эксперименты с трамбовками Тр-I, Тр-6, его необходимо назначать не более 50 Н. Для навесной машины усилие  $\Sigma F_h$  является значительным резервом повышения ударного импульса при соответствующем выборе трамбователя и навески-манипулятора, способного передать усилие корпусу трамбователя.

Выражение для определения статического напряжения в месте контакта трамбующей плиты с грунтом

$$\sigma_{ct} = S_r^i f / A_t \leq [\sigma_{ct}], \quad (3)$$

где  $A_t$  — площадь контакта плиты с грунтом;

$[\sigma_{ct}]$  — нормативное статическое давление, необходимое для достижения в процессе уплотнения заданной плотности  $\rho_h$ . По данным<sup>3</sup> для обеспечения плотности грунта  $\rho_h = (0,97\dots0,98)\rho_{dmax}$  на всю глубину уплотнения, принятой  $h \approx (1\dots1,2)a$ , необходимо, чтобы  $[\sigma_{ct}]$  находилось в пределах 20,0...25,0 МПа; для  $\rho_h = 0,95 \rho_{dmax}$  —  $[\sigma_{ct}] = 8,0\dots11,0$  МПа. Для пневмотрамбователей, учитывая результаты эксперимента, давление  $[\sigma_{cjk}^m] = 20\dots25$  КПа обеспечит требуемую плотность  $\rho_h = (0,97\dots0,98) \times \rho_{dmax}$  при глубине уплотняемого слоя  $h = (2,0\dots2,5)a$ , а  $[\sigma_{ct}] = 8\dots11$  КПа,  $\rho_h = 0,95 \rho_{dmax}$  при этой же глубине. Требуемая плотность обратной засыпки для суглинков должна быть не ниже  $0,95 \rho_{dmax}$  и для глинистых грунтов с толщиной отсыпки свыше 6 м —  $0,98 \rho_{dmax}$ .

Таким образом,

$$S_r^i = [\sigma_{cjk} \cdot A_t / f]. \quad (4)$$

---

<sup>3</sup> Хархута Н.Я., Андрейченко Ю.Я. Выбор основных параметров вибрационных плит // Строительные и дорожные машины. 1988. № 10. С. 7—9.

При известном ударном импульсе машины  $S_r^i$  можно определить ее массу, приняв  $\Sigma F_h = 0$ ,

$$m_m = S_r^i \cdot f / g, \quad (5)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения. Определенная таким образом масса пневмотрамбователя гарантирует достижения необходимой плотности грунтов обратной засыпки. Рассматривая процесс ударного уплотнения грунта пневмотрамбователем, имеем:

$$S_r^i = m_1 V_y, \quad (6)$$

где  $m_1$  — масса ударной части машины (обычно включает поршень-шток и трамбующую плиту), кг;

$V_y$  — предударная скорость, м/с.

Из зависимости  $S_r^i = i A_t$ , где  $i$  — удельный ударный импульс, Па·с, при  $i = k i_p$ , где  $i_p$  — предельный удельный ударный импульс грунта, Па·с, следует

$$S_r^i = K \cdot i_p A_t. \quad (7)$$

Значения  $i_p$  для различных групп грунтов с учетом их влажности  $W$ , %, и  $\Delta$ , %, приведены в [1, 2]. Значения  $K < 1$  при уплотнении без значительного проникания плиты в грунт и  $K > 1$  при «штыковании» и вытрамбовании.

Находим средние динамические напряжения в точке контакта поверхности плиты с грунтом за время первой фазы соударения

$$\sigma_{cp} = S_r^i / (A_m \tau_1), \quad (8)$$

где  $\tau_1$  — время первой фазы соударения, с.

Из соотношения (6) при известной скорости начала удара  $V_y = 3...5$  м/с для существующих пневмотрамбователей и рекомендуемой для свободнопадающих плит 5...6 м/с и в отдельных случаях до 8 м/с, определяем массу ударной части  $m_1 = S_r^i / (V_y)$ , обеспечивающей необходимый процесс уплотнения.

Зависимости (1)–(8) при заданной производительности и характеристиках уплотняемого грунта обратной засыпки позволяют определить меньший размер уплотняющей плиты  $a$  или ее диаметр при круглой форме, массу машины  $m_m$  и ударной части  $m_1$ , рационально выбрать глубину уплотнения  $h$  и назначить частоту ударов  $f$ . При проектировании по соотношениям (4), (7), (8) определяются необходимые величины генерируемых импульсов  $S_r^i$  и для дальнейшего расчета принимается большее из значений, по которому определяются и уточняются остальные технологические параметры с учетом размерно-параметрического ряда машин.

*2.3. Определение рабочих параметров пневмоударного механизма.* Исходными для расчета данными будут являться сетевое давление  $P_c$ , значение генерируемого импульса  $S_r^i$  и структурно-пневматические схемы, принятые по рекомендациям<sup>4</sup>. Определение параметров внутреннего рабочего цикла и геометрии ударного механизма изложено автором<sup>5, 6</sup>.

<sup>4</sup> Суворов Д.Г. Классификация ручных пневматических машин ударного действия и их структурно-пневматические схемы // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1983. № 10. С. 130–135.

<sup>5</sup> Суворов Д.Г. К вопросу проектирования автоматизированных строительных пневмоударных машин // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1988. № 3. С. 98–101.

<sup>6</sup> Суворов Д.Г. Применение автоматических систем управления в пневматических ручных машинах ударного действия // Строительные и дорожные машины. 1991. № 3. С. 17–20.

Уточним выбранную ранее предударную скорость  $V_y$

$$V_y = 0,45P_2A_2/(m_1f), \quad (9)$$

где  $P_2$  — среднее давление сжатого воздуха за время рабочего хода, Па;  $A_2$  — площадь поршня со стороны камеры рабочего хода,  $\text{м}^2$ .

Для определения  $A_2$  и  $d_2$  используем формулу<sup>1</sup>

$$A_2 = S_r^i / \left( P_\zeta^p \cdot \frac{t^2}{2} - P_{(3)} t - m_1 g t \right), \quad (10)$$

где  $t = (0,30...0,46)$  от времени цикла  $T_{\text{ц}}$ ;

$P_\zeta^p = (4,5...4,8) \cdot 10^6$  Па/с — размерный коэффициент скорости изменения давления в камере рабочего хода;

$P_{(3)}$  — давление сжатого воздуха в начале рабочего хода, Па.

Для определения рабочего хода поршня  $S$  воспользуемся уравнением баланса энергий

$$P_2 A_2 S = m_1 V_y^2 / 2 \quad (11)$$

или

$$P_2 A_2 S = (S_r^i)^2 / (2m_1), \quad (12)$$

из (11), (12) рабочий ход поршня

$$S = m_1 V_y / (2P_2 \cdot A_2) = (S_r^i) / (2m_1 P_2 \cdot A_2). \quad (13)$$

Общую оценку прогрессивности конструктивного решения можно дать на основе системного анализа, позволяющего разработать экономико-математические модели грунтоуплотняющих машин на базе пневмотрамбователя.

Предлагаемая методика была апробирована при разработке технического проекта бесшаблонного пневматического молотка с АСУ для разрушения мерзлого грунта и трамбования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Хархута, Н.Я. Машины для уплотнения грунта [Текст] / Н.Я. Хархута. — Л. : Машиностроение, 1973. — 173 с.
- Костельцов, М.П. К вопросу регулирования ударной нагрузки трамбующих машин [Текст] / М.П. Костельцов // Строительные и дорожные машины. — 1968. — № 5. — С. 13–15.
- Вощинин, Н.П. Перспективы развития трамбующих машин для уплотнения грунтов [Текст] / Н.П. Вощинин // Строительные и дорожные машины. — 1969. — № 8.
- Федулов, А.И. Ударные уплотнения грунтов [Текст] / А.И. Федулов, Р.А. Иванов, В.В. Пучков. — Новосибирск : ИГД СО АН СССР, 1983. — 118 с.

СУВОРОВ Дмитрий Григорьевич, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 15.03.12

**Suvorov Dmitriy Grigorievich**, doctor of technical sciences, professor; Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

#### ON SEALING EQUIPMENT DESIGN BASED ON PNEUMATIC PISTON MACHINE

Development gruntouplotnyayuscheho equipment, including pneumatic machine in manual or attachment execution, analysis and optimization requires a significant number of

parameters associated with the dynamics of pneumatic machines and sealing properties of soils. Some of these problems are solved, taking into account both static and dynamic properties of machines, as objects of the seal.

Key words: a pneumatic machine, soil, compaction.

#### REFERENCES

1. Kharkhuta, N.Ya. Maschiny for Soil Compaction [Text] / N.Ya. Kharkhuta. — L. : Mechanical Engineering, 1973. — 173 p.
  2. Kostelov, M.P. On the question of regulation of tamping machines shock [Text] / M.P. Kostelov // Construction and Road Machines. — 1968. — N 5. — P. 13–15.
  3. Voshchinin, N.P. Prospects for the development of machines for tamping soil compaction [Text] / N.P. Voshchinin // Construction and Road Machines. — 1969. — N 8.
  4. Fedulov, A.I. Shock Compaction of Soil [Text] / A.I. Fedulov, R.A. Ivanov, V.V. Puchkov. — Novosibirsk : IGD SO AN SSSR, 1983. — 118 p.
-

## НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ

УДК 711.112

И.В. КУКИНА

### К ВОПРОСУ О НЕПЛАНОВОМ РАЗВИТИИ БУФЕРНЫХ ЗОН В СТРУКТУРЕ СОВРЕМЕННОГО ГОРОДА

В регулировании развития современных городов приобретает значение адаптация естественно-научных достижений в прикладные исследования в градостроительстве и историографических исследований города, содержащих факторные данные о градостроительном процессе. Важными вопросами в данной связи становятся: что есть целое, элементарное в структуре города; как описать его свойства; как определить его границы; как установить режим цельности, неразрушимости; что есть методы сохранения и как все вместе перечисленное может быть введено в режим регулирования дальнейшего развития градосистем.

Ключевые слова: буферные зоны, окраинные пояса, границы.

С ростом урбанизированных территорий все более проблематичным становится четкое, логичное, жизнеспособное устройство населенных мест. В этой связи в практике градостроительства структуризация поселений противопоставляется хаосу их непланового развития. В российской теории города существуют два противоречивых угла взорений: гармонизация среды и рационализация использования территорий.

В профессиональном сообществе в последней трети XX в. сложилось представление о городе как о живом, во многом самостоятельно развивающемся организме, для которого характерны явления бифуркаций, энтропии, синергии и пр. Последние определения заимствованы из точных и естественных наук по методу неких аналогий и, очевидно, не могут с достаточной точностью описывать закономерности развития современного города. Поэтому современная теория города развивается по трем направлениям: выстраивание методов исследования по аналогии с точными, естественными науками; адаптация естественно-научных достижений в прикладные исследования в градостроительстве и адаптация историографических и урбоморфологических исследований города, содержащих факторные данные о градостроительном процессе.

Общим в подходах гармонизации и рационализации структуры современного города становится установление режима неразрушимости города, что невозможно без сохранения направленной динамики естественного развития незапланированных процессов и явлений; индивидуальности и некоторой самостоятельности его отдельных частей. В данной связи важно определить, что есть целое в «конструкции» города, что есть элементарное, как описать их свойства. Чем старше город, тем больше он напоминает палимпсест, глубже контрасты его отдельных частей, пробле-

мы реконструкции и тем очевиднее необходимость сохранения морфологического разнообразия среды города. Архитектурно-средовое богатство «физической» истории требует установления границ каждого из ареалов, пространственного «определения». В этой связи понимание, что есть границы города и границы в городе, как они формируются, может ли изучение процесса их формирования привести к рекомендациям по совершенствованию структуры современных городов, приобретают особую остроту.

Одной из составляющих кризиса крупных городов в XIX — начале XX в. стало изменение сущности границы города. Укрепленные границы средневековых городов — стены, валы, рвы, заполненные водой, несмотря на яркую конфигурацию и четкие физические размеры, архитектоничную целостность с городом, играли роль в большей степени социально-политических границ. Речь идет о конфликте социальных групп как равных составляющих: человек / человек. Процесс развития плана средневекового города по М. Р. Г. Конзену включает возникновение города, уплотнение застройки, формирование пространственных преград росту города, «перешагивание» таких преград, формирование и изменение морфологической однородности планировочных единиц, дисперсное развитие города. Пространственными преградами росту города являются фиксационная линия, шов, окраинный пояс [1].

Фиксационную линию составляют фортификационные сооружения и городские стены. При последующем росте города она формирует линию между «внутристенным пространством и ближайшим внутренним окраинным поясом». Фиксационные линии также могут иметь форму «физических» величин, таких как реки, рукотворных (антропогенных) величин, таких как железные дороги, или даже нематериальный характер, как, например, территориальные планировочные ограничения, принятые местными органами власти для частных землевладений. По мере того как экономическое, социальное, демографическое, политическое давление на градостроительное развитие превышает устойчивость барьеров развития, сформированных фиксационными линиями, город разрастается за своими пределами. Он «переступает» «фиксационную» линию, пользуясь теорией Малиша вследствие сверхувеличения пороговых нагрузок на планировочную структуру города.

Обычно новая городская окраина менее плотная и включает большее количество открытых пространств, чем часть города внутри фиксационной линии. Даже если физическая структура устойчивости смешена, формы на земле отражают линию барьера, например, кольцеобразные улицы, повторяющие линию стен. Понятие «фиксационная линия» включает пространственный смысл, поскольку имеет ширину, может быть измерена в системе координат и служит, по определению Конзена, барьером для развития города.

«Швы» плана — «линии, делящие генетически разные части плана города». Присоединенные участки, строительные процессы различных морфологических периодов, единицы плана, морфологические и ландшафтные районы города или наименьшего масштаба морфотопы будут разделены швами плана.

Окраинный пояс идентифицирован Луисом в процессе изучения плана Берлина (Louis, 1936). Концепция была более глубоко разработана М. Конзеном в 1960 г. в процессе изучения развития плана Элнвика, а затем на примере крупных городов Шотландии Дж. Уайтхэндом [2]. Он определен как «поясообразная зона ... временно-постоянная ... медленно развивающаяся окраина города, состоящая из планировочных единиц смешан-

ного функционального использования, изначально ориентированных на периферийное местоположение» [1]. В городах с глубокой историей окраинные пояса проявляются как система последовательного расположения концентрических окраинных поясов, разделенных другими, чаще жилыми образованиями. Окраинные пояса представляют собой очень важный внутренний структурный элемент городов, где фиксационная линия имела сильное сдерживающее значение. Составить схему регулирования и управления развитием этих территорий, имеющих неравномерное развитие, низкую плотность застройки и сложнейшие внутренние функциональные связи, очень сложно. Городской окраинный пояс характеризуется спонтанностью и типизируется единственно перемещением индивидуальных функций из центра на периферию. Ван дер Долен доказывает, где города развивались вследствие административных актов, окраинный пояс не имеет места, поскольку «решения пользователей, причины перемещения и требования к пространствам здесь сделаны на нижнем, индивидуальном уровне». Таким образом, он определил окраинную территорию как форму и процесс одновременно.

Границы промышленного города — границы между поселениями людей (город и деревня) и природой или неосвоенным ландшафтом. В этот период границы перестают быть физическими четкими, вместо них формируются пригородные ареалы. Они естественно складывались в процессе эволюции города, погашают или обостряют конфликт поселения (антропогенного ландшафта) и природного комплекса. Конфликт тем более обостряется, чем плотнее на окраине города располагаются промышленные производства, вспомогательные, коммунальные, транспортные и технологические объекты и городские трущобы.

Теоретические поиски и концепции в конце XIX — начале XX в. были направлены на поиск условий «оптимума» градообразований и в том числе рациональной взаимосвязи «город — окружающая среда», вышедшей из средневековых отношений. Попытки осознать, сформулировать в программах развития городов, что есть граница города, как город должен взаимодействовать или разграничиваться с окружающими его землями не избежала ни одна из градостроительных концепций или утопий XX в.

Так, П. Гедес в сечениях-схемах выделяет зону постепенного перехода девственных земель в урбанизированные. Э. Говард рассчитывает примерную площадь в 12 500 га окраинной территории в городе-саде. Она представляет собой в основном зеленый пояс, состоящий не только из сельскохозяйственных ферм, здесь должны были найти место рекреационные зоны, исправительные, оздоровительные и учебные учреждения, более характерные для города, но и с возможным использованием для сельского населения. В концепции, таким образом, окраинной территории придается значение неплотной общественно-активной зоны, «работающей» на город и на прилегающие сельские поселения. Ле Корбюзье проводит горизонтальный зеленый пояс между небоскребами и уровнем земли, радикально отрывая город от природного начала (план Вуазен, Лучезарный город). Э. Сааринен развивает теорию «органической децентрализации» крупного города, соединенного магистральными в зеленых зонах, разделяющих планировочные единицы. Э. Сааринен разработал свои предложения по децентрализации Хельсинки, Нью-Йорка, Чикаго, Детройта и Хартфорда. В моделях индустриального города Тони Гарнье и линейного города Сориа-и Мата, Н. Милютина предполагаются протяженные зеленые разрывы между городом и природным комплексом, куда вы-

носятся рекреационные функции и зеленые разрывы защитного характера вдоль линии промышленного производства и т.д.

В отечественной градостроительной теории поиски границ, скорее, «вошли в тело» города. Так, Н.С. Ухина определяет пограничные зоны как особые территории в городе, «где непосредственно соприкасаются друг с другом различные функциональные и композиционные зоны: промышленные и жилые, исторические и современные районы, крупные массивы зелени и жилой застройки и т.д.» (Ухина, 1993). Основными пограничными зонами определены: исторические границы, прибрежные и промышленно-селитебные пограничные зоны, пограничные зоны исторических и современных районов. О.Н. Явейн [3] систематизировал употребляющиеся в литературе об архитектуре термины, характеризующие различные виды границ: фильтр, буфер и шлюз на основе терминов, предложенных С. Шермаевым, К. Александером, А. Молем, И.Г. Лежавой. О. Явейн, как и К. Линч, определяет границу в городе как пространственное отношение, которое подобно идеальной черте, не имеющей толщины, неделимо. Границей может быть объемный элемент или самостоятельное пространство. Б.Б. Родоман указывает на то, что расплывчатость, бордюрность, эффект края «являются общей чертой, свойственной всем организмам, природным и антропогенным ландшафтам, а также многим зданиям и сооружениям, их частям и комплексам». В.Л. Каганский, В.Е. Шувалов обосновывают барьерную и контактную функции географических границ в городе. К.Н. Ненарокова вводит понятие «деятельный слой» в зоне контакта города и его окружения: «комплекс зданий, сооружений и насаждений, открытых сельскохозяйственных пространств, расположенных на поверхности земли; его верхней границей может считаться предел вертикального влияния на атмосферные слои, нижней — на геологические слои». Последнее определение очень близко к пониманию окраинных территорий в немецкой и английской школах урбоморфологии, но вносит существенное дополнение — влияние города на природный комплекс по вертикали от геологических слоев до атмосферных. Тем самым подчеркивается вся глубина технологических изменений в структуре города, характерных для конца XX в. Однако в целом разграничительные территории исследуются и оцениваются скорее с позиции «характера поведения» пространства и аналитического сравнения с явлениями в других областях знания, не прибегая к фактологическому изучению накопления определенных свойств и их эволюции.

В прикладном градостроительстве сформулированы понятия «пригородная зона» и разработана планировочная иерархия зеленых зон различного функционального назначения (на основе концепции открытых пространств), разделяющих структурные элементы города (в трудах М. Хауке, Ю.Б. Хромова, А.П. Вергунова, М.Е. Вайтенса, В.А. Каменского, В.А. Нефедова, Л.С. Залесской, Е.М. Микулиной); исследованы первые результаты функционирования пригородных зон (С.М. Геращенко, С.Б. Поморов).

Города Северной Америки колониального происхождения развивались по другому сценарию, и традиции формирования окраин города отличаются от европейских. Дж. Форрестер выстраивает теорию динамики развития современного американского города, описывая процессы образования поясов неоднородности застройки, поочередно выполняющих буферные функции. В то время как в центре города происходит замена трущоб новыми зданиями в ближайших к старой части города новых окраинных районах идет постепенное устаревание жилых и промышленных помещений. Преуспевающий класс начинает переселяться в новые зда-

ния. В результате внутренние окраинные районы со временем станут постепенно расширяющимися наружу, в направлении от центра зонами трущоб. В «волнообразном» перемещении стагнирующих территорий заключается динамика развития города по Дж. Форрестеру.

Процесс един, но форма отличается. В европейских городах не сломлена приверженность живописности плана, определенной в урбоморфологии как «ментальная память общества», как естественный процесс пространствия крупнейших урбоорганизмов из средневековой «согласованности» человека с природой, находившего в географии места и жилье, защиту, пищу и композиционную ориентацию собственного микромира и города в пространстве. Однако планировка американского города также в очень большой степени держалась на менталитете переселенцев массового периода, прибывавших в города-порты Нового Света: Нью-Йорк (получивший план «решетки» в 1811 г.), Филадельфию (колониальный регулярный план 1680 г.) и Чикаго (1820 г.).

Конец XVIII в. — время доминирования «аграрной этики» домовладений и минимальной не ограничивающей градостроительной политики в США. Но «аграрная философия» XVIII в. стала и движущей силой, приведшей к устройству общественных парков во второй половине XIX в., становлению единой государственной системы национальных парков в 30–40 гг. XX в., формированию концепции «зеленых коридоров», прорезающих «решетку» плана, и, в конце концов, к концепции экологического планирования в 60-х гг. XX в. Именно в процессе устройства национальных парков Йелоустоун и Иосемитский впервые была осознана сущность конфликта человек / природная среда, для погашения которого и были запроектированы буферные зоны. В XX в. буферные зоны проектируются сначала для национальных дорог США (парковая дорога Блу Ридж, парковые дороги Нью-Йорка, Бостона и др.), а затем «входят» в тело плотного города в «зеленых коридорах» [4]. И во всех трех случаях используется в одном и том же значении буфер «непроникновения» антропогенных и природных структур. Буфер «непроникновения» состоит из последовательно расположенных слоев-зон различной степени регулирования, с постепенным нагнетанием заданной экологической емкости территории. Буферные зоны дорог — это сложная протяженная пространственная композиция, отделяющая скоростные дороги от сельскохозяйственных и девственных земель. Сюда включены серия линейных парков вдоль дороги с вкраплениями систем обслуживания, фермы-музеи и городки-музеи, восстановленные как экспозиция времен колонизации.

В последней четверти XX столетия были найдены способы адаптирования фундаментальных научных методов экологии (как биологической науки), географии (как равноценной составляющей урбоморфологии), химии (как неотъемлемой части вопросов санитарной гигиены городов), физики (флуктуационные процессы), математики и других прикладных исследований для нужд теоретического и практического градостроительства. Достижения естественных наук вводятся в «экологическое планирование». Цель — обеспечение здорового образа жизни за счет наиболее рационального использования физико-географических особенностей городов и поселений, наиболее благоприятного сосуществования человека и других биологических видов в современной техногенной среде со всеми ее составляющими. Сутью политики экологического планирования стало «включение» планировочных единиц в структуру природного комплекса. Показательно, что первые проекты поселков экологического планирования выполнены именно в ландшафтных проектных фирмах Харбор Таун, Си Пайнз Плантэйшн в компании «Сасаки, Уолкер и Ассо-

циация», Ривер Ранчо, Плезант Гарденс — ассоциации СНК и др. (всего более 200 объектов в списке Американской Ассоциации Планирования).

Концепции «город — сад будущего» и «экологического планирования» объединяет сильная «природная составляющая», однако базируются они на принципиально различных постулатах. В концепции «город-сад» город находится в центре микрокосма, природа «оберегает» его, оттягивая на себя некие рекреативные функции, и в этом смысле несет в себе заданность «окраинности» как полярной центру составляющей. Экологическое планирование 60-х гг. прошлого века — в определенном смысле возврат к средневековому пониманию взаимоотношений «человек — природа», «вписывание» в ситуацию. В центре внимания, а часто и композиции сохранение особенных элементов природного комплекса: болота и его экосистем, дельты реки, леса, дюн побережья, скалистой пустыни и т.д. Постепенная переориентация понимания места человека, города в природной среде.

Близкой к концепциям экологического планирования и урбоморфологии в отечественном градостроительстве можно считать концепцию ландшафта города, сложившуюся в рамках ландшафтно-экологических исследований в области реконструкции городов в 1970-х — начале 1980-х гг. в ЦНИИП градостроительства (В.И. Гуцаленко, Б. Тобилевич). Были сформулированы представления о структуре ландшафта города, состоящей из ландшафтных районов и различий, и методика определения границ морфологической неоднородности ландшафтных районов города. Концепция складывалась в процессе изучения таких крупных городов, как Екатеринбург, Львов, Барнаул, Кунгур, Калуга, Пенза, Свердловск и др. (Бочаров, 1988, 1989; Крайняя, 2009).

Сравнивая выводы исследований о необходимости выделения окраинных поясов, о динамике и периодичности развития города, о морфологически разнокачественных территориях в городе, становится очевидным особый статус территорий между городом и окружающими его землями, а также границ, швов, фиксационных линий, «поглощенных» городом.

Практически все исследователи, «работающие на границе города» или исследующие проблемы внутренних разграничений, согласны с тем, что пространства такого рода в совокупности представляют собой одну из полноправных структур современного города, подлежащих планированию, проектированию и регулированию.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Conzen, M.R.G. Alnwick, Northumberland: a study in town-plan analysis. George Philip [Текст] / M.R.G. Conzen. — London : Institute of British Geographers Publication, 1960. — № 27. — P. 135.
2. Whitehand, J.W.R. Urban fringe belts - development of an idea [Текст] / J.W.R. Whitehand // Planning perspective. — 1988. — № 3. — P. 54–55.
3. Явейн, О.Н. Проблемы пространственных границ в архитектуре [Текст]: автореф. дис. ... канд. архит. / Олег Николаевич Явейн. — М., 1982. — 28 с.
4. Унагаева, Н.А. К вопросу о культурологическом подходе в решении инженерных и экологических проблем методами современной ландшафтной архитектуры [Текст] / Н.А. Унагаева // Вестн. КрасГАУ. — 2006. — № 1. — С. 541–544.

КУКИНА Ирина Валерьевна, канд. архит., доц.; E-mail: ikukina@inbox.ru  
Институт архитектуры и дизайна СФУ, Красноярск

Получено 16.03.12

**Kukina Irina Valerievna**, candidate of architecture, assistant professor; E-mail: ikukina@inbox.ru, Institute of Architecture and Design, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

## **TO THE QUESTION ON THE BUFFER ZONES UNPLANNED DEVELOPMENT IN THE STRUCTURE OF THE MODERN CITY**

When regulating the development of modern cities special attention should be paid to the adaptation of advances of natural sciences in applied research in urban planning and historiographical study of cities, containing factorial data on urban process. In this regard the following issues are most important: what is the whole and basic in the structure of the city, how to describe their properties, how to define their borders, how to set the integrity, indestructibility, that is, methods of conservation and listed all together can be put into further development of the regulatory regime of the city-system.

Key words: buffer zones, fringe belts, boundaries.

### REFERENCES

1. Conzen, M.R.G. Alnwick, Northumberland: a study in town-plan analysis. George Philip [Text] / M.R.G. Conzen. — London : Institute of British Geographers Publication, 1960. — N 27. — P. 135.
  2. Whitehand, J.W.R. Urban fringe belts - development of an idea [Text] / J.W.R. Whitehand // Planning perspective. — 1988. — N 3. — P. 54–55.
  3. Yavein, O.N. The problems of the spatial boundaries in the Architecture [Text] : authoref. dis. ... cand. arch. /Oleg Nikolaevich Yavein . — M., 1982. — 28 p.
  4. Unagaeva, N.A. To the question about cultural approach in the engineering and ecological problems solving with the methods of the contemporary landscape architecture [Text] / N.A. Unagaeva // Vestnik KrasGAU. — 2006. — N 1. — P. 541–544.
-

## НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 532.59:532.595

В.И. БУКРЕЕВ, В.В. ДЕГТЯРЕВ-мл., А.В. ЧЕБОТНИКОВ

### ЭВОЛЮЦИЯ ВОЛНЫ ИЗЛИВА В КАНАЛЕ ОГРАНИЧЕННОЙ ДЛИНЫ С ПЕРЕМЕННОЙ ПЛОЩАДЬЮ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ\*

Приведены результаты опытов, в которых волна излива распространялась в закрытой системе, состоящей из относительно узкого прямоугольного канала и соединенного с ним более широкого бассейна. В результате многократного отражения от закрытых концов канала и бассейна формировалась многомодовая сейша. Показано, что длины и частоты колебаний различных мод хорошо описываются линейной теорией в рамках модели идеальной жидкости. Приведены экспериментальные данные об амплитудах различных мод и о декременте затухания.

Ключевые слова: резкое расширение прямоугольного канала, волна излива, сейшевые колебания.

Рассматривается эволюция волн, образующихся при кратковременном попуске воды в прямоугольный канал, на входе которого имеется существенно более широкий бассейн. Свободные концы канала и бассейна закрыты вертикальными стенками. При многократном отражении бегущих волн от этих стенок формируется многомодовая сейша. При сильно упрощенной геометрии такая постановка задачи соответствует волнам в системах шлюз и аванпорт или река и водохранилище, перегороженные плотинами. Случай аналогичных волновых движений в канале с постоянной площадью поперечного сечения изучался в опытах [1, 2].

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1, где показаны ее размеры и используемая далее неподвижная прямоугольная система координат. На расстоянии  $l$  от закрытого торца канала располагался плоский щит, создающий начальный перепад глубин верхнего  $h_+$  и нижнего  $h_-$  бьефов. В момент времени  $t = 0$  щит удалялся вертикально вверх. Выполнялось сравнение случаев быстрого (за 0,1 с) и медленного удаления щита. При достаточно быстром удалении щита и достаточно большой разности начальных глубин в верхний бьеф распространяется волна понижения уровня, а в нижний бьеф — простая прерывная волна. При отражении от закрытого конца бассейна (левого на рис. 1) первая отраженная волна распространяется по попутному течению, а навстречу ей распространяется по встречному течению первая отраженная волна от закрытого конца канала. В дальнейшем в системе начинаются сейшевые колебания, и волновая картина складывается из длинных волн

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Программы Президиума РАН (проект № 9.23) и Интеграционного проекта Сибирского отделения РАН № 132.

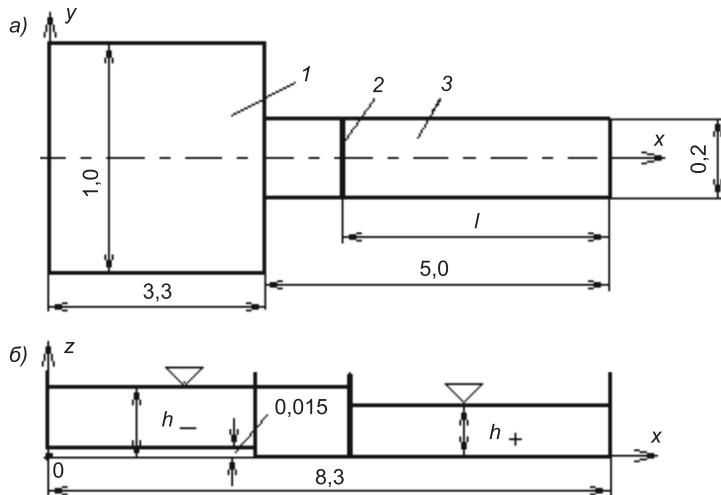


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

а — вид сверху; б — продольный разрез;  
1 — бассейн, 2 — щит, 3 — канал (размеры даны в м)

сейши и более коротких бегущих волн. Специальным выбором параметров  $l$ ,  $(h_+ - h_-)$  и времени удаления щита можно реализовать режим, в котором бегущие волны оказываются существенно слабее сейши.

С помощью неподвижных волномеров, расположенных при различных значениях координат  $x$  и  $y$ , измерялись отклонения глубины  $\eta(x, y, t)$  от постоянной асимптотической глубины  $h_{as}$ , которая устанавливается через некоторое время после удаления щита. Количественное значение асимптотической глубины определяется выбранными значениями параметров  $l$ ,  $(h_+ - h_-)$  и геометрическими размерами, приведенными на рис. 1.

С помощью стандартной программы быстрого преобразования Фурье (FFT) определялись спектры  $S(if, \Pi_i)$  функции  $\eta(x, y, t)$ , где  $f$  — частота колебаний в Гц,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $\Pi_i$  — множество заданных параметров, включая координаты  $x$  и  $y$ . Указанный спектр является комплексной функцией. Далее используется только модуль спектра  $|S|$ , который симметричен относительно  $f = 0$ , и приводится только его правая часть. Для каждой конкретной функции  $\eta$  определялись спектры, полученные при различных значениях начальной  $t_0$  и конечной  $t_k$  точек интервала времени, на котором осуществлялось преобразование Фурье. При этом использовался стандартный алгоритм сглаживания на концах интервала, который в стандартной компьютерной программе FFT отмечается термином Hanning. Дополнительная информация о методике проведения опытов содержится в [1, 2].

На рис. 2 приведены два характерных примера функции  $\eta(t)$ . Волномер располагался при значении  $y = 0$  на расстоянии 5 см от закрытой торцевой стенки канала (при  $x = 8,25$  м). Вблизи этой стенки амплитуда колебаний глубины была наибольшей при всех рассмотренных значениях глубин  $h_-$  и  $h_+$ . Время отсчитывается от начала подъема щита. Щит располагался на расстоянии  $l = 4,15$  м от закрытого торца канала и на таком же расстоянии от закрытого торца бассейна. В примере, представленном на рис. 2, а, щит удалялся быстро, и начальная разность глубин верхнего и нижнего бьефов была относительно большой, так что до отражения от

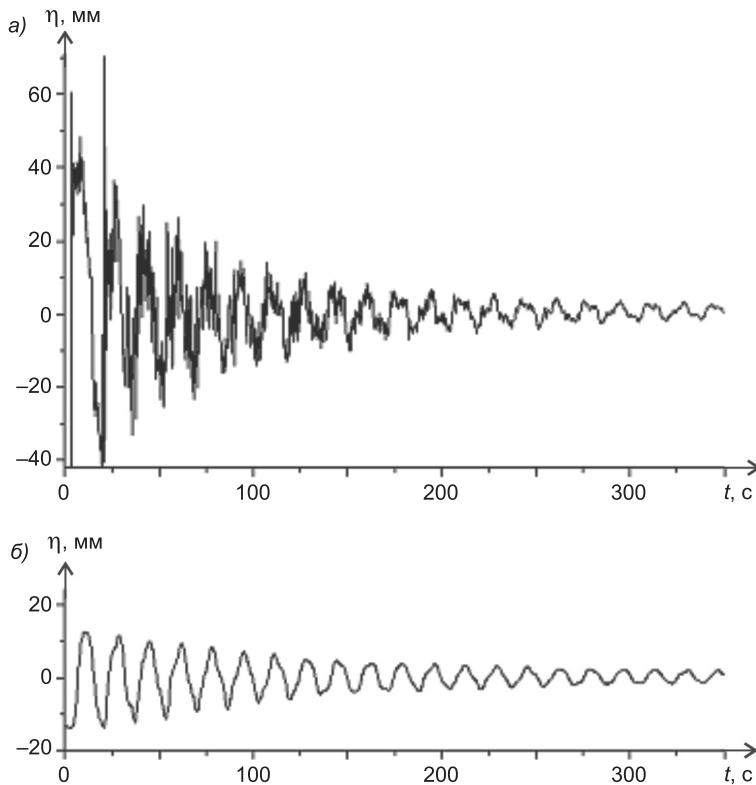


Рис. 2. Примеры эволюции волн

*a* — быстрый подъем щита,  $h_- = 164,5$  мм,  $h_+ = 38$  мм,  $h_{as} = 240,5$  мм; *б* — медленный подъем щита,  $h_- = 145,2$  мм,  $h_+ = 125,4$  мм,  $h_{as} = 143,2$  мм

торца канала волна излива имела вид ондулярного бора с обрушающимся передним фронтом. В этом случае бегущие волны в системе вносили существенный вклад в колебания глубины.

В примере, представленном на рис. 2, *б*, начальная разность глубин верхнего и нижнего бьефов была значительно меньше, чем в предыдущем примере, а асимптотическая глубина практически такой же. Щит поднимался медленно (примерно за 5 с). Волны все время были гладкими. Бегущие волны были значительно слабее сейши.

На рис. 3 представлены модули спектров  $|S|^0$ , соответствующих функциям  $\eta(t)$ , приведенным на рис. 2. Верхний индекс ноль означает, что модули спектров нормированы на их максимальные значения (в рассматриваемых примерах — на значения при частоте  $f_1 = 0,061$  Гц). В спектрах выделился ряд частот. Часть из них соответствует частотам различных мод сейшевых колебаний. В случае прямоугольного бассейна длиной  $L$  и шириной  $B$  с ровным горизонтальным дном частоты  $f_n$  сейшевых колебаний, соответствующих различным нормальным модам, вычисляются по формуле [3]

$$f_n = \frac{\sqrt{gh}}{2} \sqrt{\frac{p^2}{L^2} + \frac{q^2}{B^2}}, \quad (1)$$

где  $p = 1, 2, 3, \dots$ ,  $q = 1, 2, 3, \dots$  — номера нормальных мод, соответствующих продольным и поперечным колебаниям,  
 $g$  — ускорение свободного падения.

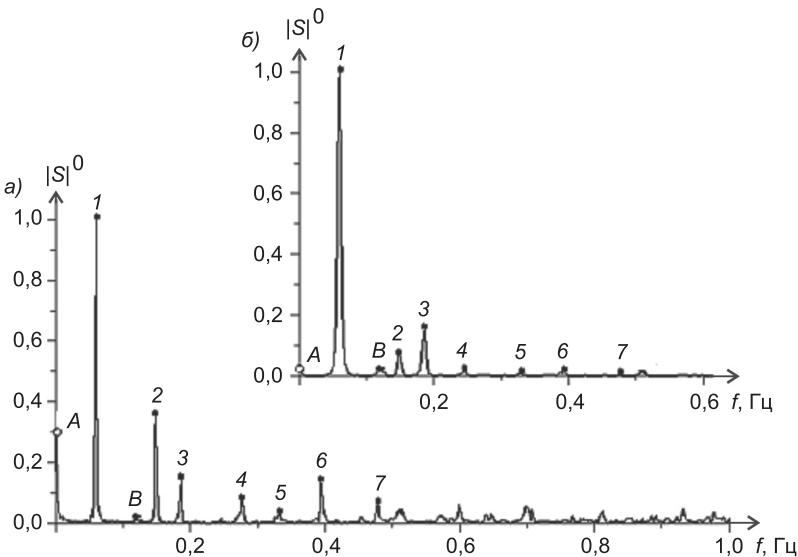


Рис. 3. Нормированные модули спектров функций  $\eta(t)$ , приведенных на рис. 2

Опыты [1, 2], выполненные в канале длиной 5 м и шириной 0,2 м, хорошо подтвердили формулу (1) и показали, что поперечными колебаниями в таком относительно узком канале можно пренебречь.

Априорно можно ожидать, что в рассматриваемой системе проявится влияние всех характерных линейных размеров системы, а именно: суммарной длины канала и бассейна  $L_{\Sigma} = 8,3$  м, длины только канала  $L_k = 5$  м, длины только бассейна  $L_b = 3,3$  м, ширины канала  $B_k = 0,2$  м, ширины бассейна  $B_b = 1$  м и превышения отметки дна бассейна над отметкой дна канала  $\delta = 0,015$  м. Расчеты по формуле (1) при различных сочетаниях входящих в нее характерных длин из приведенного их набора показали, что ни одна из выделившихся частот на рис. 3 не соответствует расчетным значениям. Это следствие более сложной формы бассейна.

Метод численного расчета нормальных мод сейшевых колебаний для реальных водоемов сложной формы, например, для озер, предложен в работе [4]. Метод основан на линейных уравнениях движения идеальной жидкости. Проверка этого метода в условиях более простой геометрии, чем в случае реальных водоемов, служила одной из целей настоящих опытов. Соответствующие расчеты выполнила по просьбе авторов И.В. Струрова. Оказалось, что в рассматриваемых примерах теория [4] хорошо описывает частоты, соответствующие семи первым модам. На рис. 3 экстремумы модулей спектров, соответствующие этим частотам, помечены цифрами 1–7. Наибольшее расхождение расчетных и экспериментальных частот имело место для седьмой моды. Оно составляет 3,5 %. Для других мод расхождение значительно меньше. В частности, для первой моды расхождение составляет 0,3 %, для второй — 1,2 %, для третьей моды 1,7 %.

Буквой А на рис. 3 помечен экстремум модуля спектра, соответствующий очень низкой частоте  $f_A = 0,0015$  Гц. Этот экстремум теорией [4] не описывается. Он обусловлен тем, что глубина воды в эксперименте не сразу выходит на постоянное асимптотическое значение  $h_{as}$ , которое использовалось в расчетах. В расчетах нет также экстремума, помеченного на рис. 3 буквой В. Этот слабый экстремум обусловлен отражением волн

от поперечного сечения, в котором узкий канал сопрягается с широким бассейном. Значение соответствующей частоты определяется по формуле (1), если использовать в ней значения  $p = 1$ ,  $q = 0$  и  $L = L_k$ .

На рис. 3, *a* имеются также не описываемые теорией малые по величине экстремумы модуля спектра на более высоких частотах, чем частоты сейшевых колебаний. Эти экстремумы обусловлены бегущими волнами. В опыте, результаты которого приведены на рис. 3, *б*, бегущие волны были слабыми, и соответствующих экстремумов практически нет.

Расчеты на основе метода [4] позволяют определить только длины волн и частоты сейшевых колебаний в отсутствие бегущих волн. Экспериментальные данные, приведенные на рис. 3, иллюстрируют относительное влияние указанных линейных размеров и бегущих волн на амплитуды колебаний. Амплитуды колебаний, соответствующих различным модам, зависят от интенсивности вносимого возмущения. В случае медленного слабого излива (рис. 3, *б*) основной вклад в суммарные колебания вносят первая, вторая и третья моды. В случае быстрого и более интенсивного излива (см. рис. 3, *а*) заметный вклад вносят и более высокие моды.

Данные, приведенные на рис. 2, показывают, что свободные волны, обусловленные кратковременным возмущением, достаточно быстро вырождаются. На рис. 4 приведены графики функций  $\eta_{\max}(t)$ , где  $\eta_{\max}$  — максимальное повышение глубины относительно ее асимптотического значения  $h_{as}$ . В теории колебаний такие графики называются огибающими. Сплошная и штриховая линии на рис. 4 — результаты аппроксимации экспериментальных данных следующей формулой:

$$\eta_{\max} = a + b \exp(-\alpha(t - t_0)), \quad (2)$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $\alpha$ ,  $t_0$  — параметры функции (2), зависящие от заданных параметров задачи. В теории колебаний параметр  $\alpha$  называется декрементом затухания. Штриховая линия на рис. 4 соответствует колебаниям, представленным графиком на рис. 2, *а*. Для этой линии  $a = 3,2$  мм,  $b = 44,3$  мм,  $\alpha = 0,0167$  1/c,  $t_0 = 15,9$  с. Сплошная линия на рис. 4 соответствует графику, приведенному на рис. 2, *б*. Для этой линии  $a = 0,8$  мм,  $b = 13$  мм,  $\alpha = 0,0081$  1/c,  $t_0 = 0$ .

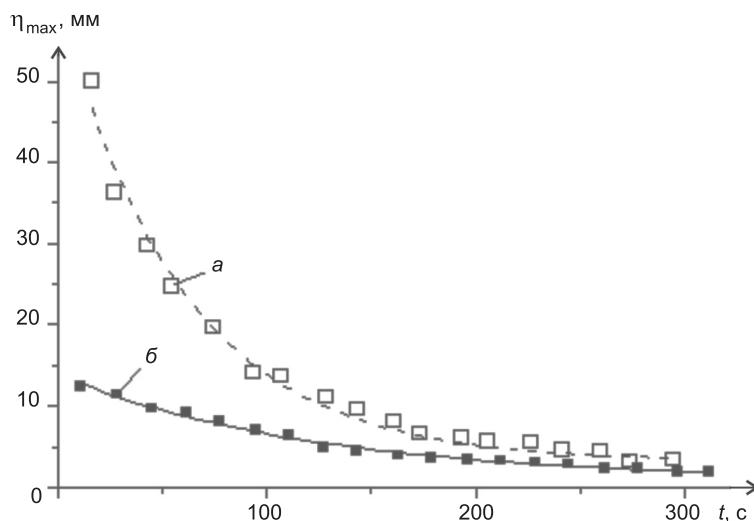


Рис. 4. Верхние огибающие функций  $\eta(t)$ , приведенные на рис. 2

Полученные экспериментальные данные показывают, что с ростом интенсивности возмущения декремент затухания увеличивается. Следует отметить, что в методе [4] расчет выполняется в рамках модели идеальной жидкости, и вырождение волн не учитывается. Тем не менее по этим параметрам сейши имело место хорошее совпадение с экспериментом.

**Выводы.** Метод расчета сейшевых колебаний в реальных водоемах, предложенный в [4], получил подтверждение в выполненных опытах. Этот метод позволяет определить только длины волн и частоты колебаний, соответствующие различным нормальным модам. В выполненных опытах получены также данные о соответствующих амплитудах колебаний. В рассмотренном случае геометрии канала и способа внесения возмущений возбуждалось семь нормальных мод. Опыты показали, что затухание слабо влияет на длину волн и частоту сейшевых колебаний.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Букреев, В.И. Эволюция ондулярного бора в прямоугольном канале ограниченной длины [Текст] / В.И. Букреев, В.В. Дегтярев, А.В. Чеботников // Изв. вузов. Строительство. — 2010. — № 9. — С. 39–45.
2. Букреев, В.И. Распад начального разрыва глубины воды в канале ограниченной длины: Эксперимент [Текст] / В.И. Букреев // Прикл. мех. и техн. физика. — 2011. — Т. 52, № 5. — С. 17–26.
3. Коchin, Н.Е. Теоретическая гидродинамика. Ч. I [Текст] / Н.Е. Кочин, И.А. Кильель, Н.В. Розе. — М. : Физматгиз, 1963. — 584 с.
4. Rao, D.B. Two dimensional normal modes in arbitrary enclosed basins on a rotating Earth: application to Lakes Ontario and Superior [Текст] / D.B. Rao, D.J. Schwab // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. — 1976. — V. 281. — P. 63–96.

*БУКРЕЕВ Виктор Иванович, д-р физ.-мат. наук, проф.*

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск  
ДЕГТЬЯРЕВ Владимир Владимирович, д-р техн. наук, проф.*

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Сибстрин)*

*ЧЕБОТНИКОВ Алексей Владимирович, канд. техн. наук*

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, г. Новосибирск*

Получено 02.03.12

**Bukreev Victor Ivanovich**, doctor of physical and mathematical sciences, professor, Lavrentyev's Institute of Hydrodynamics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

**Degtyarev Vladimir Vladimirovich**, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

**Chebotnikov Alexey Vladimirovich**, candidate of technical sciences, Lavrentyev's Institute of Hydrodynamics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

#### **EVOLUTION OF A RELEASE WAVE IN A CHANNEL OF A LIMITED LENGTH WITH VARIABLE CROSS-SECTIONAL AREA**

The results of experiments are presented in which a release wave was propagated along a closed system consisting of relatively narrow channel and a wider pool connected with the channel. A multi-mode seiche was formed as a result of multiple reflections from the closed ends of the channel and the basin. It is shown that the length and frequency of oscillations of

different normal modes are well described by linear theory in the framework of ideal fluid. Experimental data on the amplitudes of different modes and the damping rate are given.

**K e y w o r d s:** sharp extension of rectangular channel, release wave, seiches fluctuations.

#### REFERENCES

1. B u k r e e v, V.I. Evolution of the undular bore in a channel of a limited length [Text] / V.I. Bukreev, V.V. Degtyarev, A.V. Chebotnikov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2010. — N 9. — P. 39–45.
  2. B u k r e e v, V.I. Decay of an initial discontinuity of water depth in a finite-length channel: Experiment [Text] / V.I. Bukreev // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. — 2011. — V. 52, N 5. — P. 17–26.
  3. K o c h i n, N.E. Theoretical hydrodynamics. Part 1 [Text] / N.E. Kochin, I.A. Kibel, N.V. Rose. — M. : Fizmatgiz, 1963. — 584 p.
  4. R a o, D.B. Two dimensional normal modes in arbitrary enclosed basins on a rotating Earth: application to Lakes Ontario and Superior [Text] / D.B. Rao, D.J. Schwab // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. — 1976. — V. 281. — P. 63–96.
-

**УДК 624.042:534.014**

**А.В. ДУКАРТ, ВЬЕТ НГОК ФАМ, ТХАНЬ БИНЬ ФАМ**

**О ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ КОЛЕБАНИЙ  
ЗАЩИЩАЕМОГО ОБЪЕКТА С ГАСИТЕЛЕМ,  
РАСПОЛОЖЕННОГО НА ПОДДЕРЖИВАЮЩЕЙ  
КОНСТРУКЦИИ, ПРИ ДЕЙСТВИИ НА НЕЕ  
ОДИНОЧНОГО ИМПУЛЬСА**

Рассматриваются свободные колебания демпфированной системы с тремя степенями свободы, состоящей из массивной поддерживающей конструкции и защищаемого объекта с динамическим или ударным гасителем. Колебания системы вызваны приложенным к поддерживающей конструкции мгновенным импульсом. Предполагается, что исходная система обладает непропорциональным трением. Изучается влияние параметров системы на характер переходных процессов колебаний защищаемого объекта и гасителя.

**Ключевые слова:** защищаемый объект, поддерживающая конструкция, динамический гаситель, ударный гаситель, свободные колебания, вязкое трение, одиночный импульс, переходные режимы (процессы).

Динамические и ударные гасители колебаний, как правило, используются для подавления повышенного уровня вибрации конструкций, сооружений или их отдельных ответственных элементов (далее – защищаемый объект) при возмущающих нагрузках, приложенных непосредственно к защищаемому объекту [1, 2]. Вместе с тем широкий класс инженерных задач связан с необходимостью локальной виброзащиты гибких объектов, опирающихся на значительно более массивные поддерживающие конструкции при действии на них ударных, взрывных, сейсмических и иных нестационарных нагрузок. Решение многих таких задач требует не только снижения уровня вибрации, но и сокращения длительности переходных процессов свободных, вынужденных и свободных сопровождающих колебаний защищаемого объекта [2]. К настоящему времени эффективность гасителей колебаний для локальной виброзащиты гибких объектов при указанных воздействиях исследована сравнительно мало.

В монографиях [1, 2], в частности, изучаются возможности применения одномассовых динамического и ударного гасителей для демпфирования колебаний защищаемого объекта, вызванных действием однократного импульса, приложенного к массивной поддерживающей конструкции. При большом различии масс поддерживающей конструкции и защищаемого объекта, моделируемых системами с одной степенью свободы, и близости парциальных частот переходные режимы свободных колебаний системы сопровождаются резким повышением уровня вибрации защищаемого объекта, которое особенно ярко проявляется при малых величинах его внутреннего неупругого сопротивления. Исходя из анализа такой динамической системы, в основу решения задачи положено допущение о том, что влияние защищаемого объекта на колебания поддерживающей конструкции мало и поэтому может не учитываться, что позволяет рас-

членить систему на две — защищаемый объект и поддерживающую конструкцию. При действии мгновенного импульса на поддерживающую конструкцию она совершает свободные затухающие колебания. Последние, в свою очередь, представляют собой кинематическое возбуждение основания защищаемого объекта, совершающего при этом колебания типа затухающих биений, отклонения которых вначале нарастают, а затем убывают. Показано, что гасители колебаний позволяют не только существенно снизить максимальные отклонения, но и повысить темп затухания колебаний защищаемого объекта.

Цель настоящей работы — решение подобной задачи без указанного допущения о возможности расчленения исходной системы, состоящей из последовательно соединенных между собой массивной поддерживающей конструкции и гибкого защищаемого объекта с присоединенным к нему динамическим или ударным гасителем. Колебания системы вызваны действием однократного мгновенного импульса  $S_0$ , приложенного к поддерживающей конструкции. Предполагается, что все звенья системы моделируются системами с одной степенью свободы. Неупругое сопротивление в звеньях системы учитывается в соответствии с гипотезой линейно-вязкого трения [3], причем принимается, что исходная система обладает непропорциональным демпфированием. На рис. 1 приведена расчетная схема системы с ударным гасителем колебаний (УГК) одностороннего действия, которая при отсутствии соударений между гасителем и защищаемым объектом представляет собой расчетную схему системы с динамическим гасителем колебаний (ДГК).

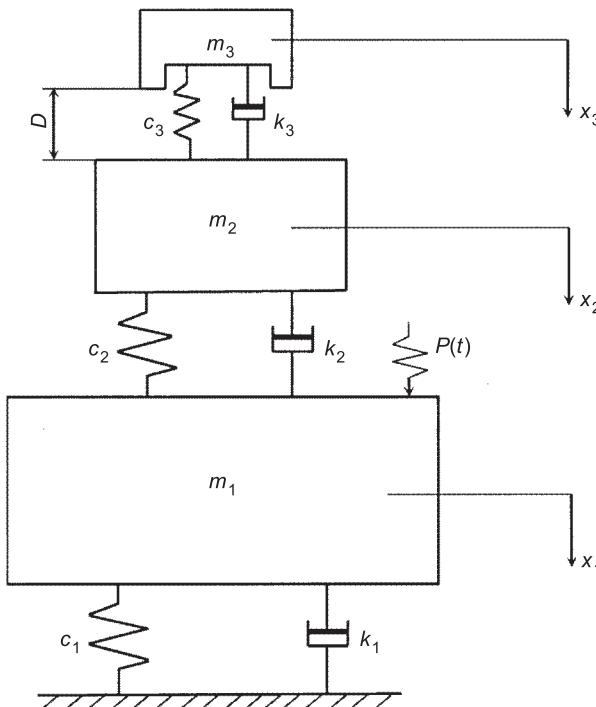


Рис. 1. Расчетная схема защищаемого объекта, оборудованного гасителем колебаний и установленного на массивной поддерживающей конструкции

динамическим гасителем получим как частный случай этого решения. Будем считать, что в промежутках между любыми двумя последовательными соударениями масс гасителя и защищаемого объекта в моменты времени  $t = t_k$  и  $t = t_{k+1}$  движение системы описывается линейными дифференциальными уравнениями:

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

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

Общее решение уравнений (1) в интервале времени  $t_k^+ \leq t \leq t_{k+1}^-$  должно удовлетворять начальным условиям движения масс при  $t = t_k$

$$x_j(t_k) = x_{j,k}; \quad \dot{x}_j(t_k^+) = \dot{x}_{j,k}^+; \quad j = \overline{1,3}, \quad (2)$$

где  $t_k^-$  и  $t_k^+$  — моменты начала и окончания контактного взаимодействия масс  $m_2$  и  $m_3$  при  $t = t_k$ . Соударения масс принимаются мгновенными и оцениваются коэффициентом восстановления при ударе<sup>1</sup>  $0 < R < 1$ , поэтому  $t_k^+ - t_k^- \rightarrow 0$ ;  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ , причем  $k = 0$  соответствует начальному моменту движения системы ( $t = 0$ ), т.е.  $t_0 = 0$ . В (2)  $\dot{x}_{j,k}^+$  представляют собой послеударные скорости масс; обозначим через  $\dot{x}_{j,k}^-$  их доударные скорости. Отметим, что мгновенные приращения получают скорости только соударяющихся масс, т.е.  $m_2$  и  $m_3$ . Их послеударные и доударные скорости связаны соотношениями<sup>1</sup>

$$\begin{aligned} \dot{x}_{2,k}^+ &= \frac{(m_2 - m_3 R)\dot{x}_{2,k}^- + m_3(R+1)\dot{x}_{3,k}^-}{(m_2 + m_3)}; \\ \dot{x}_{3,k}^+ &= \frac{(m_3 - m_2 R)\dot{x}_{3,k}^- + m_2(R+1)\dot{x}_{2,k}^-}{(m_2 + m_3)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Функции  $x_j(t)$ , являющиеся решениями уравнений (1), найдем, следуя [1, 3]. Для общего случая начальных условий (2) функции отклонений  $x_j(t)$  и скоростей  $\dot{x}_j(t)$  масс системы в промежутке времени  $[t_k^+, t_{k+1}^-]$  могут быть представлены в вещественной форме

$$\begin{aligned} x_j^{(k)}(t) &= 2 \sum_{v=1}^3 e^{-0.5h_v(t-t_k)} [(\beta_{2v-1}^{(j)} \alpha_{2v-1}^{(k)} - \beta_{2v}^{(j)} \alpha_{2v}^{(k)}) \cos \omega_v(t-t_k) - \\ &\quad - (\beta_{2v}^{(j)} \alpha_{2v-1}^{(k)} + \beta_{2v-1}^{(j)} \alpha_{2v}^{(k)}) \sin \omega_v(t-t_k)]; \\ \dot{x}_j^{(k)}(t) &= 2 \sum_{v=1}^3 e^{-0.5h_v(t-t_k)} \{ (\beta_{2v}^{(j)} \alpha_{2v-1}^{(k)} + \beta_{2v-1}^{(j)} \alpha_{2v}^{(k)}) [0.5h_v \sin \omega_v(t-t_k) - \\ &\quad - \omega_v \cos \omega_v(t-t_k)] - (\beta_{2v-1}^{(j)} \alpha_{2v-1}^{(k)} - \beta_{2v}^{(j)} \alpha_{2v}^{(k)}) [(0.5h_v \cos \omega_v(t-t_k) + \\ &\quad + \omega_v \sin \omega_v(t-t_k))] \}. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь  $\alpha_{2v-1}^{(k)}$  и  $\alpha_{2v}^{(k)}$  — произвольные постоянные;  $\omega_v > 0$  и  $h_v > 0$  — частоты и коэффициенты демпфирования свободных колебаний исходной системы, являющиеся корнями  $\lambda_{2v-1} = -0.5h_v + i\omega_v$  и  $\lambda_{2v} = -0.5h_v - i\omega_v$  характеристического уравнения

$$(m_3 \lambda_l^2 + k_3 \lambda_l + c_3) [m_2 \lambda_l^2 (k_2 \lambda_l + c_2) + (m_1 \lambda_l^2 + k_1 \lambda_l + c_1)(m_2 \lambda_l^2 + k_2 \lambda_l + c_2)] + \\ + m_3 \lambda_l^2 (k_3 \lambda_l + c_3) [m_1 \lambda_l^2 + (k_1 + k_2) \lambda_l + c_1 + c_2] = 0; \quad l = \overline{1,6}; \quad i = \sqrt{-1}.$$

Коэффициенты распределения амплитуд свободных колебаний системы вычисляются по формулам

$$\beta_{2v-1}^{(1)} = 1; \quad \beta_{2v}^{(1)} = 0;$$

<sup>1</sup> Гольдсмит В. Удар. Теория и физические свойства соударяемых тел. М.: Стройиздат, 1965. 449 с.

$$\begin{aligned}\beta_{2v-1}^{(2)} &= (d_{1,v}d_{5,v} + d_{2,v}d_{6,v})/d_v; \quad \beta_{2v}^{(2)} = (d_{2,v}d_{5,v} - d_{1,v}d_{6,v})/d_v; \\ \beta_{2v-1}^{(3)} &= (d_{3,v}d_{5,v} + d_{4,v}d_{6,v})/d_v; \quad \beta_{2v}^{(3)} = (d_{4,v}d_{5,v} - d_{3,v}d_{6,v})/d_v; \\ d_v &= d_{5,v}^2 + d_{6,v}^2,\end{aligned}\quad (5)$$

где

$$\begin{aligned}d_{1,v} &= m_1[(0,25h_v^2 - \omega_v^2)^2 - h_v^2\omega_v^2 + h_v(h_{01} + h_{03})(3\omega_v^2 - 0,25h_v^2) + \\ &+ (\omega_{01}^2 + \omega_{03}^2 + 4h_{01}h_{03})(0,25h_v^2 - \omega_v^2) - h_v(\omega_{01}^2h_{03} + \omega_{03}^2h_{01}) + \omega_{01}^2\omega_{03}^2]; \\ d_{2,v} &= m_1[2h_v\omega_v(\omega_v^2 - 0,25h_v^2) + 2\omega_v(h_{01} + h_{03})(0,75h_v^2 - \omega_v^2) - \\ &- h_v\omega_v(\omega_{01}^2 + \omega_{03}^2 + 4h_{01}h_{03}) + 2\omega_v(\omega_{01}^2h_{03} + \omega_{03}^2h_{01})]; \\ d_{3,v} &= m_1[h_{03}h_v(3\omega_v^2 - 0,25h_v^2) + (4h_{01}h_{03} + \omega_{03}^2)(0,25h_v^2 - \omega_v^2) - \\ &- h_v(\omega_{01}^2h_{03} + \omega_{03}^2h_{01}) + \omega_{01}^2\omega_{03}^2]; \\ d_{4,v} &= m_1\omega_v[2h_{03}(0,75h_v^2 - \omega_v^2) - h_v(4h_{01}h_{03} + \omega_{03}^2) + 2(\omega_{01}^2h_{03} + \omega_{03}^2h_{01})]; \\ d_{5,v} &= m_2[h_v^2\omega_v^2 - (0,25h_v^2 - \omega_v^2)^2] - (m_2 + m_3)[h_vh_{03}(3\omega_v^2 - 0,25h_v^2) + \\ &+ \omega_{03}^2(0,25h_v^2 - \omega_v^2)]; \\ d_{6,v} &= 2m_2h_v\omega_v(0,25h_v^2 - \omega_v^2) + 2(m_2 + m_3)\omega_v[h_{03}(\omega_v^2 - 0,75h_v^2) + 0,5h_v\omega_{03}^2];\end{aligned}$$

$$\omega_{0j} = \sqrt{c_j/m_j}; \quad h_{0j} = k_j/(2m_j).$$

Постоянные интегрирования  $\alpha_{2v-1}^{(k)}, \alpha_{2v}^{(k)}$ , соответствующие интервалу движения  $t_k^+ \leq t \leq t_{k+1}^-$ , определяются с помощью начальных условий (2) при  $t = t_k^+$ . Подставляя (4) в (2), получим относительно постоянных систему линейных уравнений

$$\bar{B}\vec{\alpha}^{(k)} = 0,5\vec{W}^{(k)}, \quad (6)$$

где  $\bar{B}$  — квадратная  $6 \times 6$  — матрица, которая с учетом (5) имеет вид

$$\bar{B} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ \beta_1^{(2)} & -\beta_2^{(2)} & \beta_3^{(2)} & -\beta_4^{(2)} & \beta_5^{(2)} & -\beta_6^{(2)} \\ \beta_1^{(3)} & -\beta_2^{(3)} & \beta_3^{(3)} & -\beta_4^{(3)} & \beta_5^{(3)} & -\beta_6^{(3)} \\ 0,5h_1 & \omega_1 & 0,5h_2 & \omega_2 & 0,5h_3 & \omega_3 \\ \bar{\beta}_1^{(2)} & \bar{\beta}_2^{(2)} & \bar{\beta}_3^{(2)} & -\bar{\beta}_4^{(2)} & \bar{\beta}_5^{(2)} & -\bar{\beta}_6^{(2)} \\ \bar{\beta}_1^{(3)} & \bar{\beta}_2^{(3)} & \bar{\beta}_3^{(3)} & -\bar{\beta}_4^{(3)} & \bar{\beta}_5^{(3)} & -\bar{\beta}_6^{(3)} \end{vmatrix};$$

$$\bar{\beta}_{2v-1}^{(j)} = 0,5h_v\beta_{2v-1}^{(j)} + \omega_v\beta_{2v}^{(j)}; \quad \bar{\beta}_{2v}^{(j)} = 0,5h_v\beta_{2v}^{(j)} - \omega_v\beta_{2v-1}^{(j)};$$

$\vec{\alpha}^{(k)}$  и  $\vec{W}^{(k)}$  — матрицы-столбцы (векторы), элементами которых являются соответственно постоянные  $\alpha_l^{(k)}$  ( $l=1,6$ ) и начальные отклонения  $x_{j,k}$  и взятые с обратным знаком начальные скорости  $\dot{x}_{j,k}^+$  масс системы

$$\vec{\alpha}^{(k)} = [\alpha_1^{(k)}, \alpha_2^{(k)}, \alpha_3^{(k)}, \alpha_4^{(k)}, \alpha_5^{(k)}, \alpha_6^{(k)}]^T;$$

$$\vec{W}^{(k)} = [x_{1,k}, x_{2,k}, x_{3,k}, -\dot{x}_{1,k}^+, -\dot{x}_{2,k}^+, -\dot{x}_{3,k}^+]^T;$$

индекс « $T$ » означает операцию транспонирования матриц. Для начально-го этапа движения системы в интервале  $0 \leq t \leq t_1^-$  матрица-столбец  $\vec{W}^{(0)}$  имеет вид

$$\vec{W}^{(0)} = [0, 0, 0, -S_0 / m_1, 0, 0]^T.$$

Относительные колебания ударного гасителя ограничены начальным зазором  $D$  (см. рис. 1)

$$\bar{x}(t) = x_3(t) - x_2(t) \leq D, \quad (7)$$

причем соударения масс  $m_2$  и  $m_3$  происходят, когда в (7) выполняется равенство и относительная скорость масс  $\dot{\bar{x}}(t)$ , соответствующая моменту соударения  $t = t_k$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ), положительна, т.е.  $\dot{\bar{x}}^-(t_k) > 0$ . В процессе отыскания моментов последовательных соударений масс  $t_k$  ( $k = 1, 2, 3, \dots$ ) из геометрического условия (7), на всех интервалах движения системы должна осуществляться проверка условия  $\bar{x}(t) < D$  при  $t_k^+ < t < t_{k+1}^-$ .

Приведенные соотношения в сочетании с подходом, связанным с пересчетом начальных условий колебаний масс для соответствующего интервала времени между последовательными соударениями гасителя и защищаемого объекта  $t_k$  и  $t_{k+1}$  [1, 4], позволяет описать движение системы с ударным гасителем и, таким образом, решать задачи анализа переходных процессов (наибольших отклонений и скоростей масс, усилий в связях системы, темпа затухания колебаний и др.) и выбора параметров ударного гасителя, исходя из соответствующих критериев качества виброзащиты. С помощью полученных уравнений решаются аналогичные задачи анализа переходных режимов движения системы с ДГК и выбора его параметров. В этом случае соударения между массами  $m_2$  и  $m_3$  отсутствуют, поэтому функции отклонений и скоростей являются гладкими и определяются, наряду с собственными свойствами рассматриваемой системы, начальными условиями при  $t = 0$ . Отметим, что приведенные уравнения движения системы с динамическим или ударным гасителями справедливы и при других способах учета трения в звеньях системы, в частности при учете неупругого сопротивления по гипотезе частотно-независимого трения Е.С. Сорокина. В этом случае можно воспользоваться соотношениями, полученными в работе<sup>2</sup>.

Ниже, как и при исследовании двухмассовых систем с динамическим<sup>3</sup> и ударным [4] гасителями, ограничимся изучением влияния параметров гасителей на характер переходных режимов движения масс рассматриваемой системы (см. рис. 1), не останавливаясь на выборе параметров гасителей для различных критериев качества виброзащиты [2], за которые могут быть приняты скорость затухания, минимум наибольших абсолютных или относительных отклонений защищаемого объекта и др.; последний случай соответствует минимизации усилий в упругой связи защищаемого объекта. Некоторые результаты вычислений в виде графиков переходных процессов абсолютных и относительных колебаний масс представлены на рис. 2–4, где обозначено

$$\begin{aligned} \mu_j &= m_j / m_1; \quad s_j = \omega_{0j} / \omega_{01}; \quad \delta_{0j} = h_{0j} / \omega_{01}; \quad y_j(\tau) = x_j(t) / x_0; \\ y(\tau) &= y_2(\tau) - y_1(\tau); \quad \bar{y}(\tau) = y_3(\tau) - y_2(\tau); \quad \tau = \omega_{01} t; \quad x_0 = S_0 / (m_1 \omega_{01}). \end{aligned}$$

<sup>2</sup> Дукарт А.В. Об эффективности двухмассового динамического гасителя колебаний с ударным звеном и частотно-независимым трением при гармонических воздействиях // Изв. вузов. Строительство. 2009. № 1. С. 7–20.

<sup>3</sup> Дукарт А.В., Фам Вьет Нгок, Фам Тхань Бинь. К определению свободных колебаний двухмассовой системы с демпфированием // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 5. С. 98–106.

Графики переходных режимов движения масс системы, приведенные на рис. 2, *a* и 3, *a*, соответствуют оптимальным параметрам динамического гасителя [2], на рис. 2, *б* и 4, *а*, *б* — оптимальной настройке УГК при заданном демпфировании и на рис. 4, *в* — оптимальным значениям настройки и коэффициента вязкого трения ударного гасителя [1] при гармонической нагрузке с постоянной амплитудой и нестабильной частотой. Аналогичные графики переходных процессов при значениях коэффициента демпфирования ДГК, отличающихся от его оптимальной величины, представлены на рис. 3, *б*, *в*. Все результаты получены для случая равенства парциальных частот колебаний поддерживающей конструкции ( $\omega_{01}$ ) и защищаемого объекта ( $\omega_{02}$ ), т.е. при  $s_2 = 1$ . Вместе с тем отметим, что соотношения настоящей работы позволяют учесть нестабильность параметров системы, в частности поддерживающей конструкции и защищаемого объекта.

Из графиков  $y_j(\tau)$ ,  $y(\tau)$  и  $\bar{y}(\tau)$  следует, что характер переходных режимов движения защищаемого объекта и гасителей существенно зависит от величин параметров ДГК и УГК; это практически не относится к колебаниям поддерживающей конструкции, которые вследствие значительного различия величин ее массы ( $m_1$ ) и массы защищаемого объекта ( $m_2$ ) затухают плавно (кривая 1 на рис. 2, *а*, *б*), подобно свободным колебаниям одномассовой системы с демпфированием. Переходные режимы абсо-

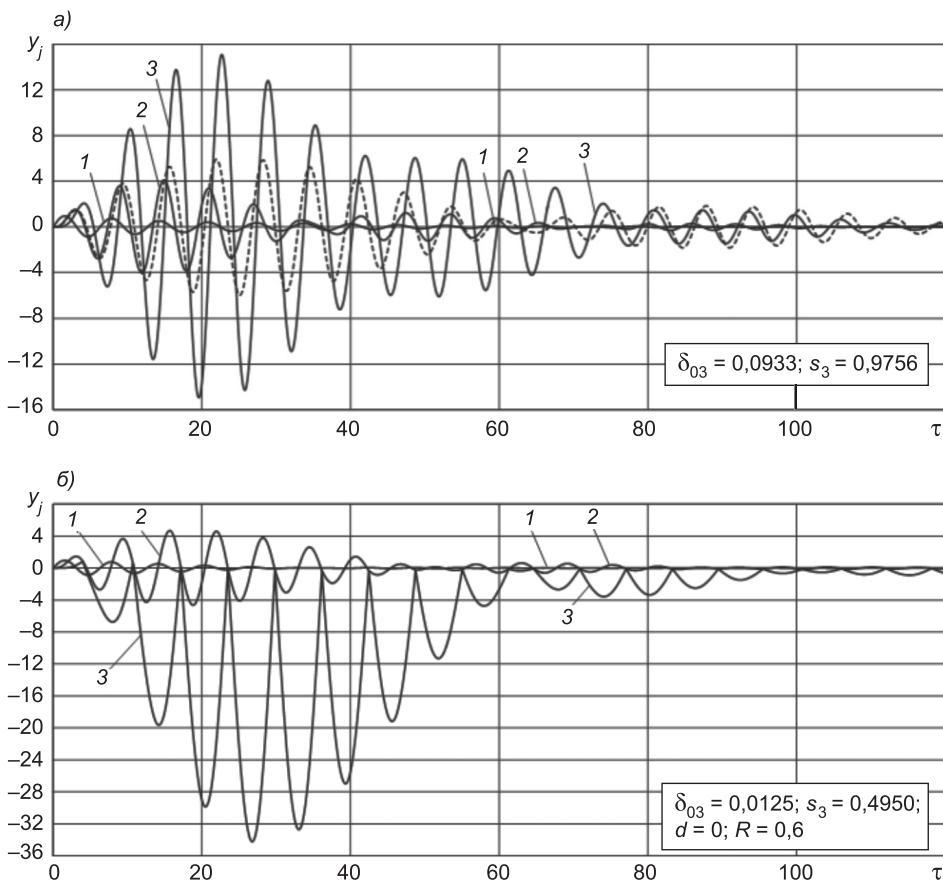


Рис. 2. Графики переходных процессов абсолютных колебаний масс системы с динамическим (*а*) и ударным (*б*) гасителями ( $\mu_2 = 0,01$ ;  $\mu_3 / \mu_2 = 0,025$ ;  $\delta_{01} = 0,025$ ;  $\delta_{02} = 0,0125$ ;  $s_2 = 1,0$ )

1 — поддерживающая конструкция; 2 — защищаемый объект; 3 — гаситель

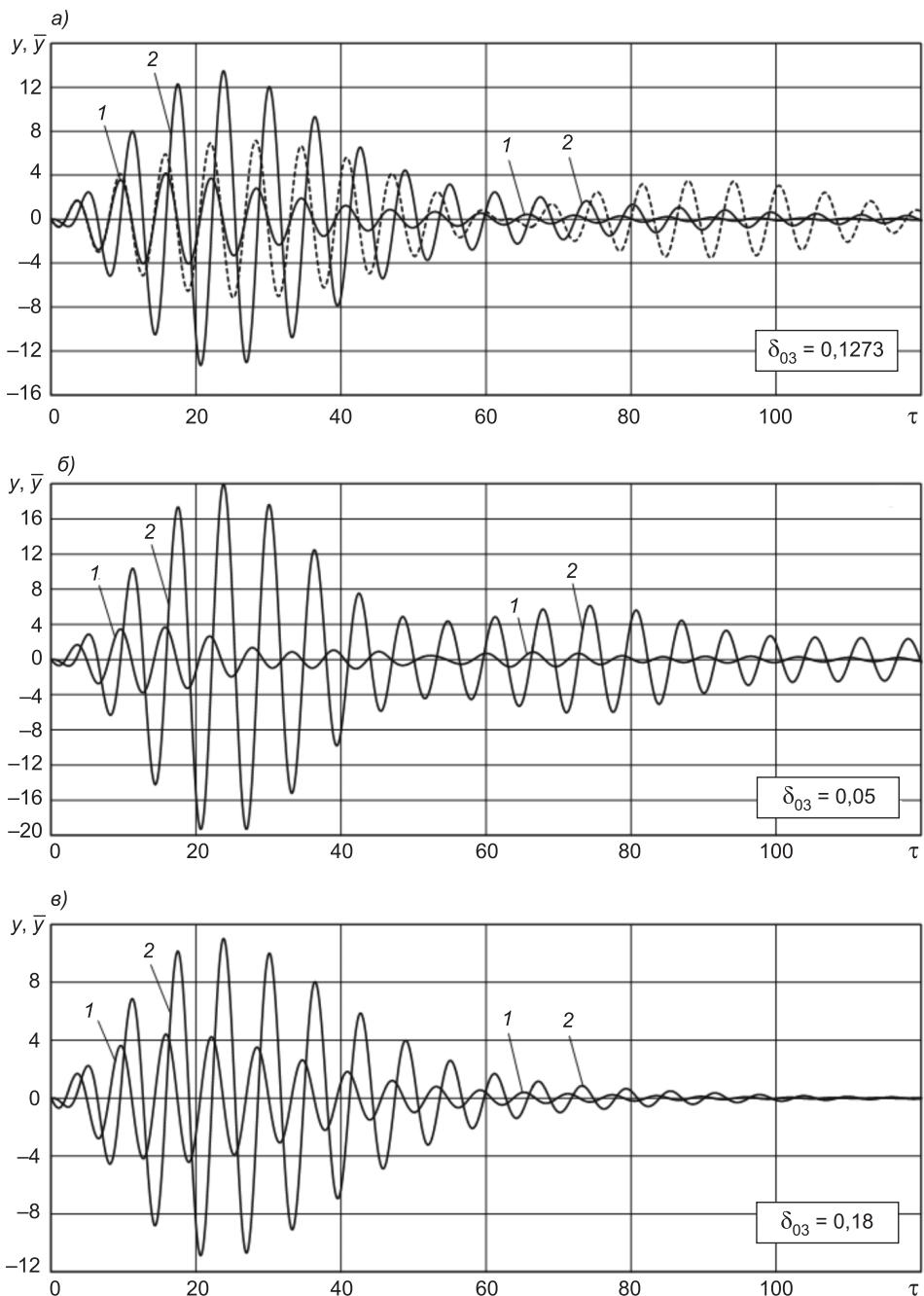


Рис. 3. Графики переходных процессов относительных колебаний масс защищаемого объекта (кривая 1) и гасителя (кривая 2) в системе с ДГК  
 $(\mu_2 = 0,01; \mu_3 / \mu_2 = 0,05; \delta_{01} = 0,01; \delta_{02} = 0,0125; s_2 = 1,0; s_3 = 0,9524)$

лютных (см. рис. 2) и относительных (см. рис. 3, 4) отклонений масс  $m_2$  и  $m_3$  в течение нескольких первых периодов колебаний быстро нарастают и далее, в зависимости от величин параметров защищаемого объекта и гасителей, их затухание происходит либо плавно (рис. 3, а, в; 4, а, в), либо сопровождается биениями (см. рис. 2, а, б; 3, б; 4, б). Отметим, что равномерное затухание колебаний защищаемого объекта с динамическим гасителем может быть достигнуто, варьируя величину коэффициента демп-

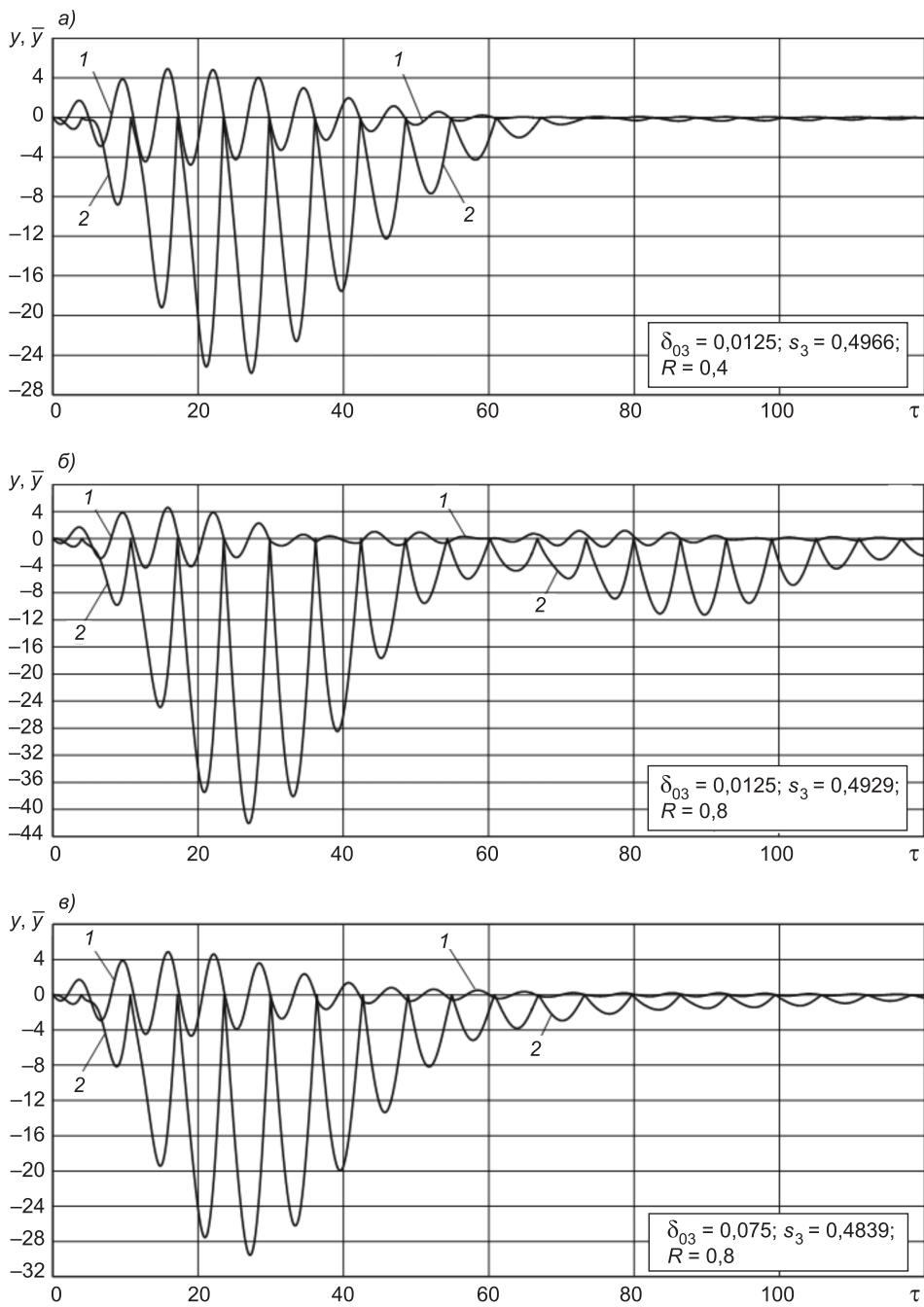


Рис. 4. Графики переходных процессов относительных колебаний масс защищаемого объекта (кривая 1) и гасителя (кривая 2) в системе с УГК  
 $(\mu_2 = 0,01; \mu_3 / \mu_2 = 0,05; \delta_{01} = 0,01; \delta_{02} = 0,0125; s_2 = 1,0; d = 0)$

фирирования в звене ДГК (см. кривые 1 на рис. 3, а, в; 3, б), а с ударным гасителем — изменением коэффициента вязкого трения в звене УГК (см. кривые 1 на рис. 4, б; 4, в) и коэффициента восстановления при ударе (см. кривые 1 на рис. 4, а; 4, б).

На рис. 2, а и 3, а пунктирумыми линиями приведены графики переходных процессов абсолютных и относительных колебаний защищаемого объекта при отсутствии гасителей. Их сопоставление с графиками функци-

ций  $y_2(\tau)$  и  $y(\tau)$ , описывающих движение массы  $m_2$  в системе с ДГК (см. рис. 2, а; 3) и УГК (рис. 2, б; 4), показывает, что гасители позволяют существенно снизить наибольшие отклонения и сократить длительность переходных режимов колебаний защищаемого объекта. Это связано с тем, что нарастание отклонений защищаемого объекта происходит в течение нескольких периодов колебаний системы, поэтому гасители, массы которых быстро раскачиваются, включаются в работу в течение одного — двух периодов и обеспечивают повышенное демпфирование колебаний защищаемого объекта. Размах колебаний масс динамического и ударного гасителей примерно совпадает, при этом с увеличением демпфирования в гасителях размах их колебаний существенно уменьшается (см. рис. 3, 4), слабо влияя на наибольшие отклонения защищаемого объекта.

Как следует из полученных результатов, динамический и ударный гасители колебаний существенно влияют на характер переходных процессов свободных колебаний защищаемого объекта, опирающегося на массивную поддерживающую конструкцию, вызванных действием на последнюю одиночного мгновенного импульса. Отметим, что приведенные соотношения могут быть использованы для решения других задач виброзащиты при иных начальных условиях движения рассматриваемой системы. Кроме того, они позволяют выполнить анализ свободных колебаний защищаемого объекта, оборудованного двухмассовым динамическим гасителем с последовательным соединением звеньев [2], в том числе, когда колебания системы сопровождаются соударениями масс гасителя<sup>2</sup> [1].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дукарт, А.В. Задачи теории ударных гасителей колебаний [Текст] / А.В. Дукарт. — М. : АСВ, 2006. — 208 с.
2. Коренев, Б.Г. Динамические гасители колебаний: Теория и технические приложения [Текст] / Б.Г. Коренев, Л.М. Резников. — М. : Наука, 1988. — 304 с.
3. Вибрации в технике [Текст] : справочник. Т. 1. Колебания линейных систем; под. ред. В.В. Болотина. — М. : Машиностроение, 1978. — 352 с.
4. Дукарт, А.В. О переходных режимах колебаний одномассовой системы с ударным гасителем при заданных начальных условиях [Текст] / А.В. Дукарт, Фам Тхань Бинь // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 6. — С. 16–22.

ДУКАРТ Адам Вилебальдович, д-р техн. наук, проф.

Московский государственный строительный университет  
ФАМ Вьет Нгок, асп.

Московский государственный строительный университет  
ФАМ Тхань Бинь, асп.

Московский государственный строительный университет

Получено 19.03.12

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

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

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

**ON TRANSIENT VIBRATIONS  
OF A PROTECTED OBJECT WITH AN ABSORBER,  
ARRANGED ON A SUPPORTING STRUCTURE,  
UNDER ACTION OF AN IMPULSE**

Free vibrations of a system with three degrees of freedom, consisting of a massive supporting construction and protected object with a dynamic or impact absorber, are examined. The vibrations of the system are caused by an instantaneous impulse applied to the supporting construction. It is assumed that the initial system possesses a disproportionate friction. The affect of the system parameters on the transients vibrations of the protected object and absorber is studied.

**Key words:** protected object, supporting construction, dynamic absorber, impact absorber, free vibrations, viscous friction, single impulse, transient processes.

REFERENCES

1. Dukart, A.V. Problems of theory impact vibration damper [Text] / A.V. Dukart. — M. : ASV, 2006. — 208 p.
  2. Korenev, B.G. Dynamic vibration dampers: Theory and engineering applications [Text] / B.G. Korenev, L.M. Reznikov. — M. : Nauka, 1988. — 304 p.
  3. Vibrations in equipment [Text] : Handbook. Vol. 1. Vibrations of linear systems; ed. by V.V. Bolotin. — M. : Mashinostroyeniye, 1978. — 352 p.
  4. Dukart, A.V. On transient vibration regimes of one mass system with impact damper for fixed initial conditions [Text] / A.V. Dukart, Pham Thanh Binh // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 6. — P. 16–22.
-

УДК 625.084.001.24

С.В. САВЕЛЬЕВ, А.Г. ЛАШКО

## ЭМПИРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПНЕВМОШИННОГО ВАЛЬЦА С БАНДАЖАМИ ДЛЯ УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ

Исследована возможность повышения эффективности передачи вибрации уплотняемой среде через пневмошинный рабочий орган дорожного катка. Проанализированы зависимости распространения виброускорений в грунте при его обработке пневмошинным вальцом с металлическими бандажами. Построены графики изменения виброускорений по толщине уплотняемого слоя при различном количестве бандажей и давлении воздуха в шинах. Доказана целесообразность предложенного технического решения для повышения эффективности уплотнения суглинистых и супесчаных грунтов.

**Ключевые слова:** уплотнение, исследование, вибрация, пневмошины, бандажи, реология, жесткость, виброускорения.

Необходимость повышения эффективности процесса уплотнения дорожно-строительных материалов не вызывает никаких сомнений. Уплотнение — наиболее распространенный способ придания необходимой прочности земляному полотну, щебеночному основанию, асфальтобетонному покрытию и другим инженерным сооружениям. Многообразие различных строительных материалов и как следствие их свойств заставляет использовать различные виды уплотнителей, поскольку для эффективного уплотнения той или иной среды необходимо использовать различные виды внешних воздействий. Именно этим и обусловлена такая номенклатура различной уплотняющей техники и дорожных катков в частности. Среди дорожных катков наиболее хорошо себя зарекомендовали вибрационные машины. Применение вибрации позволяет значительно интенсифицировать процесс уплотнения по сравнению со статической укаткой. Тем не менее проблема осуществления эффективного уплотнения различных сред не ограничивается только правильным выбором уплотняющего средства. Дополнительная сложность состоит в том, что непосредственно в процессе уплотнения среда деформируется и при каждом циклическом приложении внешней нагрузки «набирает» прочность и как следствие постоянно изменяет свои свойства. Вот здесь и возникает необходимость правильного адаптирования режимов работы уплотнителя под меняющиеся свойства обрабатываемой среды. Сразу хотелось бы отметить, что это достаточно сложная задача, поскольку описываемый процесс происходит нестационарно, свойства среды изменяются постоянно, а при вибрационном уплотнении дополнительно следует учитывать характеристики колебательного процесса, которые также регулируются в процессе уплотнения. Причем, как показывают исследования отечественных и зарубежных авторов [1, 2], именно параметры вибрационной обработки среды в большей степени влияют на эффективность протекания процесса ее уплотнения.

В СибАДИ разработан ряд перспективных конструкций рабочих органов дорожных катков, способных адаптировать свои реологические па-

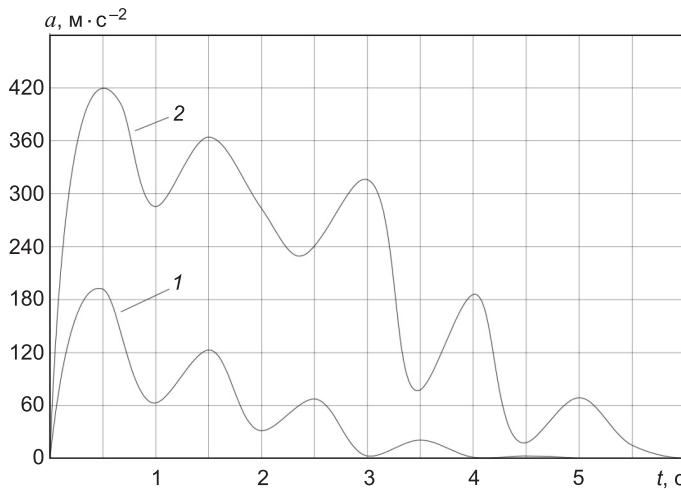


Рис. 1. График виброускорений колебаний рабочего органа

1 — кривая виброускорения колебаний в рабочем органе без бандажей; 2 — с установленными бандажами

раметры под свойства среды в течение всего процесса уплотнения. В данной статье рассматривается конструкция пневмошинного вальца, снабженного съемными металлическими бандажами [3]. Предварительные исследования [4] показали, что улучшение реологических характеристик такого рабочего органа (с точки зрения эффективного использования вибрации) достигается при давлении в шинах не менее 0,4 МПа и количестве бандажей не менее 6 штук. Тенденция продолжается до значения количества бандажей не более 12 штук и максимально возможного давления вшине. Дальнейшее увеличение количества бандажей значительно не приносит. Построен сравнительный график затухания виброускорений колебаний в рабочем органе после полученного ударного импульса (рис. 1).

Для определения эффективности использования предлагаемой конструкции необходимо отслеживать не только значения параметров вибрации вальца, но и показатели распространения вибрации по толщине уплотняемого грунта (рис. 2). Для осуществления эмпирических исследований валец устанавливался на поверхности уплотняемого слоя (рассматривались супесь и суглинок), к нему прилагался динамический импульс, имитирующий цикл вибронагружения, после чего на различной глубине слоя фиксировались значения виброускорений, передаваемых от

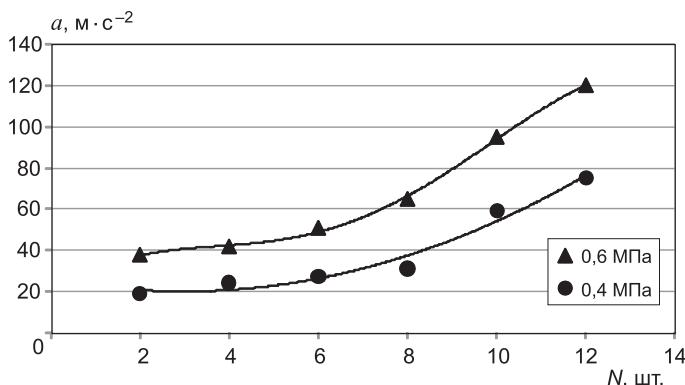


Рис. 2. Виброускорения колебаний частиц в толще грунта 0,2 м

рабочего органа частицам грунта. Анализ измеренных виброускорений показал, что с ростом давления в шине и установки бандажей (увеличением жесткости вальца) значения показателей колебаний в грунте увеличиваются, а это значит, что прорабатывается большая толщина (рис. 2–5). При наличии бандажей вынужденные колебания от вибровозбудителя к уплотняемой среде передаются в разы эффективней, при этом остается возможность изменять пятно контакта. В нашем случае даже при максимальном давлении в шине пятно контакта может изменяться за счет формы бандажей и их технологического размещения по отношению к профилю шины.

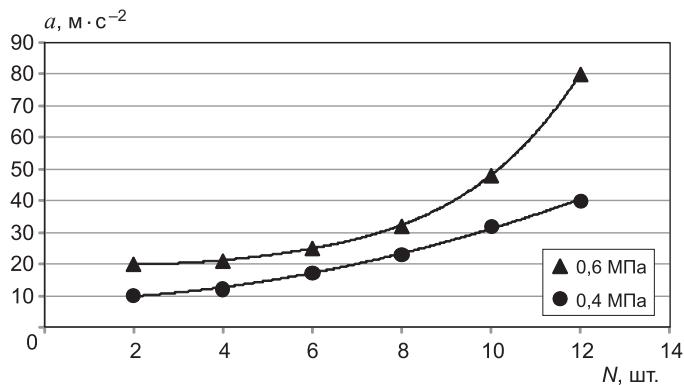


Рис. 3. Виброускорения колебаний частиц в толще грунта 0,4 м

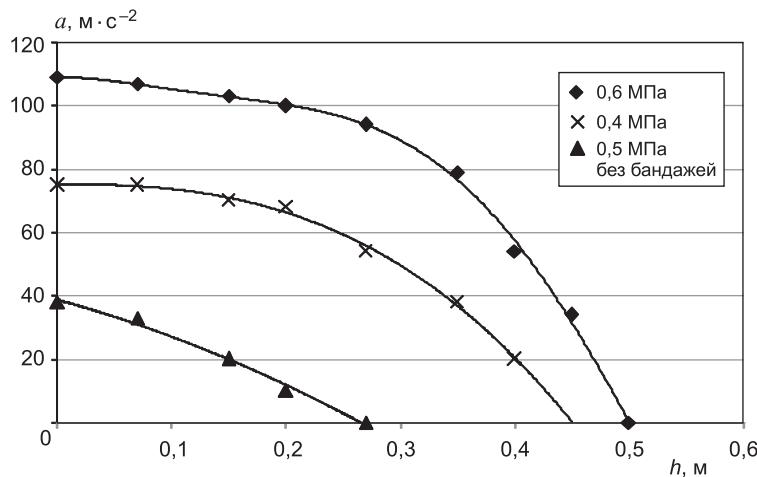


Рис. 4. Виброускорения частиц в толщине грунта (супесь) при количестве бандажей  $N = 12$  шт.

На основании полученных данных построены уравнения линий регрессии для значений параметра « $a$ » по различной толщине уплотняемого слоя (табл. 1).

Было выявлено, что наибольший эффект (относительно распространения вибраций в грунте) возникает при установке 8–12 бандажей, при этом проработка грунта для исследуемого образца составляет 35–40 см (см. рис. 4, 5), характеристики пневматика приближаются к свойствам металлических вальцов (табл. 2).

На сегодняшний день пневмоинные катки применяются на определенных этапах процесса уплотнения упруговязких сред. Такая схема ра-

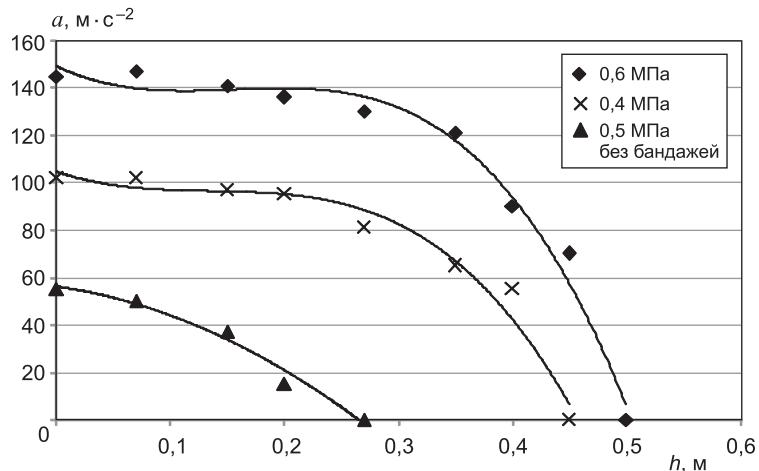


Рис. 5. Виброускорения частиц в толщине слоя грунта (суглинок) при количестве бандажей  $N = 12$  шт.

Таблица 1

**Аналитические зависимости изменения виброускорения  $a$  колебаний частиц в толще грунта, м  $\cdot$  с $^{-2}$**

Внутреннее давление вшине $P_w$ , МПа	Глубина измерения $h$ , м	
	0,2	0,4
0,6	$a = 26,925e^{0,1206 \cdot N}, R^2 = 0,933$	$a = 12,56e^{0,138 \cdot N}, R^2 = 0,9142$
0,4	$a = 13,079e^{0,1386 \cdot N}, R^2 = 0,9274$	$a = 7,1529e^{0,1454 \cdot N}, R^2 = 0,9142$

Таблица 2

**Аналитические зависимости изменения виброускорения  $a$  колебаний частиц для разных грунтов по толщине слоя  $h$  при установленных 12 бандажах и без них**

Внутреннее давление вшине $P_w$ , МПа		Уравнения линий регрессии	Величина достоверности аппроксимации
Супесь	0,6	$a = -501,34h^2 + 65,307h + 73,757$	$R^2 = 0,94$
	0,4	$a = -662,42h^2 + 137,48h + 103,47$	$R^2 = 0,93$
	0,5 без бандажей	$a = -178,54h^2 - 99,344h + 38,919$	$R^2 = 0,93$
Суглинок	0,6	$a = -732,7h^2 + 146,04h + 97,391$	$R^2 = 0,92$
	0,4	$a = -951,06h^2 + 246,6h + 135,9$	$R^2 = 0,90$
	0,5 без бандажей	$a = -546,34h^2 - 67,398h + 56,031$	$R^2 = 0,90$

бот сложилась в связи с отсутствием возможности регулирования контактных давлений  $\sigma_k$  на протяжении всего процесса уплотнения — от рыхлого состояния среды до плотного. На заключительных этапах уплотнения эффективно динамическое воздействие на среду, однако большинство современных пневмошильных катков работают в статическом режиме, так как пневматические шины демпфируют виброколебания. Проведенные экспериментальные исследования показали, что применение съемных металлических бандажей позволяет широко регулировать реологические характеристики рабочего органа, снизить его демпфирующие свойства при динамической нагрузке, тем самым имеется возможность интенсификации вибрационного воздействия на обрабатываемый материал. Эффект достигается за счет того, что металлические бандажи умень-

шают деформацию шин и препятствуют демпфированию вибрации, при этом сохраняется положительное свойство пневматиков плавно регулировать контактные давления  $\sigma_k$  в течение всего процесса уплотнения.

Следует отметить, что установка бандажей осуществляется на стандартные шины, выпускаемые серийно (в отличие от зарубежных аналогов), и потребуются лишь незначительные финансовые вложения в доработку существующего парка техники, а обслуживание и ремонт данной техники не усложняются. Это позволяет иметь такой каток, который сочетает в себе одновременно возможности легкого, среднего и тяжелого катков, тем самым ускорить процесс уплотнения материалов и резко снизить энергоемкость и трудоемкость.

Используя полученные результаты, можно сделать вывод, что регулируя значения жесткости и вязкости рабочего органа уплотнителя, относительно состояния уплотняемого материала, можно адаптировать работу катка под энергоэффективные режимы работы [4]. При этом остаются доступными классические способы регулирования параметров виброуплотнения: частоты колебаний, вынуждающей силы, массы дебалансов вибровозбудителя. Получена дополнительная возможность интенсифицировать процесс вибрационной обработки среды.

Проведенные исследования доказывают эффективность применения вибрационной обработки грунтов пневмошинными рабочими органами. Аналитические зависимости, выявленные в результате исследований, могут быть использованы при расчетах и обосновании параметров уплотняющих средств.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калужский, Я.А. Закономерности укатки грунтовых слоев жесткими катками [Текст] / Я.А. Калужский // Тр. Харьков. автомоб. дор. ин-та. — 1959. — Вып. 20. — С. 34–36.
2. Форслад, Л. Вибрационное уплотнение грунтов и оснований [Текст] / Л. Форслад; пер. с англ. И.В. Гагариной. — М. : Транспорт, 1987. — 188 с.
3. Пат. № 93090 на полезную модель. Российская Федерация, МПК: Е01 С 19/28, 19./28. Валец дорожного катка [Текст] / С.В. Савельев, А.Г. Лашко; заявитель и патентонаблюдатель Сибир. гос. автомоб.-дор. академия. — 2009146463/22; заявл. 14.12.2009; опубл. 24.04.2010 г.
4. Савельев, С.В. Уплотнение грунтов катками с адаптивными рабочими органами: монография [Текст] / С.В. Савельев. — Омск : СибАДИ, 2010. — 122 с.

САВЕЛЬЕВ Сергей Валерьевич, канд. техн. наук, доц.

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск

ЛАШКО Алексей Геннадьевич, асп.

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск

Получено 19.03.12

**Savelev Sergey Valeryevich**, candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian State Automobile and Road Academy, Omsk, Russia

**Lashko Aleksey Gennadyevich**, post-graduate student, Siberian State Automobile and Road Academy, Omsk, Russia

#### EMPIRICAL RESEARCHES OF EFFICIENCY OF APPLICATION OF PNEUMOTIRE VALTS WITH BANDAGES FOR CONSOLIDATION OF SOIL

Possibility of increase of efficiency of transfer of vibration to the condensed environment through pneumotire working body of a road skating rink is investigated. Dependences of

distribution of vibrouskoreniye in soil are analysed, at its processing to pneumotire rollers with metal bandages. Schedules of change of vibrouskoreniye on thickness of a condensed layer are constructed at various quantity of bandages and pressure of air in tires. Expediency of the offered technical solution for increase of efficiency of consolidation of loamy and sandy soil is proved.

**Key words:** consolidation, research, vibration, pneumotyres, bandages, rheology, rigidity, vibrouskoreniye.

#### REFERENCES

1. Kaluzhsky, Ya.A. Regularities of rolling soil layers rigid skating rinks [Text] / Ya.A. Kaluzhsky // Works Kharkov automobile road institute. — 1959. — V. 20. — P. 34–36.
  2. Forsblad, L. Vibrating consolidation of soil and bases [Text] / L. Forsblad; the lane with english. I.V. Gagarina. — M. : Transport, 1987. — 188 c.
  3. Pat. N 93090 on useful model the Russian Federation, MPK: E01 With 19/28, 19./28. Valets road skating rink [Text] / S.V. Savelev, A.G. Lashko, applicant and patentonablyudatel SibADI. — 2009146463/22; appl. 14.12.2009; publ. 24.04.2010.
  4. Savelev, S.V. Compaction of soil road rollers with adaptive working bodies: monograph [Text] / S.V. Savelev. — Omsk : SibADI, 2010. — 122 p.
-

# ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ РУКОПИСИ<sup>1</sup>

1. К рукописи, представляемой в редакцию на русском языке, необходимо приложить:  
— сопроводительное письмо руководства организации, откуда исходит рукопись;

**к сопроводительному письму должна быть приложена гарантия оплаты публикации статьи<sup>2</sup> за подписью автора или руководителя представляющей статью организациии. 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 Сыг размером 14 пт. с межстрочным интервалом 1,5. Объем рукописи — до 10 страниц. Обязательна нумерация страниц.

3. Порядок оформления статьи (см. макет статьи на Internet-сайте журнала):

— индекс УДК;

— инициалы, фамилии авторов;

— название статьи;

— аннотация (объемом до 0,3 страницы текста);

— ключевые слова;

— текст статьи;

— библиографический список не более четырех ссылок (при большем количестве их следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5–2008);

— сведения об авторах: **фамилии, имена, отчества (полностью), ученые степени, звания** (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать); наименование учреждений, в которых работают авторы, на русском и **английском языках**;

— почтовые адреса, телефоны и e-mail авторов;

— название статьи на английском языке;

— аннотацию на английском языке;

— ключевые слова на английском языке;

— библиографический список на английском языке.

4. На полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (ставлять их в текст не нужно — это делается при верстке).

Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).

5. Иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в программах CorelDraw или Microsoft Word, записанных с расширением \*.cdr (предпочтительно) или \*.doc, фотографий — TIFF или JPEG. Надписи и цифры набирать шрифтом Arial. Линии чертежа — не тоньше 1 пт. Иллюстрации, в том числе фотографии, должны быть черно-белыми с хорошей проработкой деталей.

Рисунки должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (внести изменения, исправления, т.е. изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки).

Иллюстрации должны быть распечатаны в двух экземплярах, с подписями к ним. Размер иллюстраций не должен превышать 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4.

6. Таблицы печатаются каждая на отдельном листе. Все наименования в них даются полностью, без сокращения слов.

7. Формулы следуют набирать на компьютере шрифтом Times New Roman размером 14 пт. Русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) набираются прямым шрифтом. Латинские буквы набирать курсивом. Во избежание смешения сходных изображений прописных и строчных букв (*V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и *k* и др., а также трудноразличимых букв и символов: *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *p*, *I* и *J* и т.п.) пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях. В статье должен быть необходимый минимум формул. Все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента).

<sup>1</sup> С дополнениями в соответствии с требованиями ВАК (выделены п/ж курсивом).

<sup>2</sup> На 2012 г. — из расчета 650 р. за 1 журнальную страницу.

(Окончание правил)

**8.** Следует применять физические величины, обозначения и единицы измерения в системе СИ(СИ).

**9.** В библиографический список включаются только те работы, которые опубликованы в печати, составленные в соответствии с ГОСТ 7.80–2000, ГОСТ 7.1–03.

Примеры оформления можно найти на Internet-сайте НГАСУ (Сибстрин) по адресу [www.sibstrin.ru](http://www.sibstrin.ru) и [www.izvuzstr.sibstrin.ru](http://www.izvuzstr.sibstrin.ru)

**10.** Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции. Материалы уже публиковавшихся работ к рассмотрению не принимаются.

**11.** Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению. При доработке статьи после рецензии на первой странице указываются ее редакционный номер, число, месяц, год и пометка «рукопись после доработки». Доработанную статью необходимо присыпать в двух экземплярах с приложением ее записи в электронном виде. К доработанной рукописи обязательно прикладывать ответы на все замечания рецензента. Датой поступления статьи считается получение редакцией ее окончательного текста.

**12.** Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются. Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста рукописей. *Корректура статей авторам не представляется.*

**13.** Гонорар за опубликованные статьи *не выплачивается*.

**14.** Рукописи, не удовлетворяющие изложенным требованиям, отправляются авторам на доработку, что замедляет срок их опубликования.

## ПРИНИМАЕТСЯ ПОДПИСКА

на 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**

**№ 5 (641) 2012**

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Т.П. Петроченко*  
Технический редактор *Н.М. Макаренко*  
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*  
Корректор *Г.И. Шведкина*