МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ

МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

**ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ**

СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 8 (680)
Август 2015 г.

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

Главный редактор В.Г. Себешев, почет. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф.

Редакционная коллегия:

А.А. Афанасьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.
В.А. Воробьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф.
В.А. Игнатьев, д-р техн. наук, проф.
В.И. Костин, д-р техн. наук, проф. (зам. гл. редактора)
Г.Б. Лебедев, канд. техн. наук, доц. (зам. гл. редактора)
Л.С. Ляхович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.
В.И. Морозов, д-р техн. наук, проф.
Ю.П. Панибратов, акад. РААСН, д-р экон. наук, проф.
Ю.П. Правдивец, д-р техн. наук, проф.
В.Г. Себешев, почет. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф.
Ю.А. Феофанов, д-р техн. наук, проф.
Е.М. Чернышов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:
630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113
Тел./факс +7 (383) 266 28 59
www.sibstrin.ru E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 27.08.15. Формат 70×108 $^1/_{16}$.
Усл. печ. л. 10,5+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 8866.

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Дукарт А.В. К определению установившихся колебаний линейной системы при произвольной периодической возмущающей нагрузке 5

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Селяев В.П., Седова А.А., Куприяшкина Л.И., Осипов А.К. Влияние концентрации фосфорной кислоты и степени наполнения цеолитсодержащей породы на прочность цементного камня 13

Бердов Г.И., Виноградов С.А., Машкин А.Н., Хританков В.Ф. Диэлькометрический анализ влияния раствора электролита на свойства цементных материалов 21

Кузнецова И.Н., Косач А.Ф., Ращупкина М.А., Гутарева Н.А. Влияние основных минералов цементного камня на его структуру и свойства 25

Абдрахимов В.З., Рощупкина И.Ю., Абдрахимова Е.С., Кайракбаев А.К., Колпаков А.В. Жаростойкий композит на основе фосфатных связующих и высокоглиноземистых отходов 33

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Авдеев Ю.В., Кононов А.Д., Кононов А.А., Варданян Н.А. К вопросу обработки сигналов навигационной системы при автоматическом дистанционном управлении машинами дорожно-строительного комплекса 41

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

Атавин А.А., Дегтярев В.В., Яненко А.П. Нестационарные процессы в судопропускных сооружениях 47

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Дедов А.С., Дмитриев М.П., Малышев М.С., Чоен Олзийбаяр. Пневмоударный механизм с перепуском между камерами рабочего и холостого хода и его физико-математическое описание 57

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Адищев В.В., Карпов Е.В., Демешкин А.Г., Карпицкая Ю.Р., Мальцев В.В., Иванов А.И. Применение оптической системы Correlated Solutions Vic 3d для построения диаграмм деформирования бетона 68

Букреев В.И., Дегтярев В.В., Чеботников А.В. Влияние немонотонной зависимости плотности от температуры на движение соленой воды 82

Высоцкий Л.И. Замечания к определению эквивалентной шероховатости 88

Гныря А.И., Коробков С.В., Мокшин Д.И., Кошин А.А., Гаусс К.С., Аношкина О.О., Терехов В.И. Исследование теплообмена моделей системы зданий. Часть 1. Отдельно стоящие призмы различной высоты 97

Князева И.А., Золотоносов Я.Д., Лисовский В.А. Изготовление теплообменных элементов на базе пружинно-витых каналов 106

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

Выдающийся ученый международного масштаба в области гидродинамики (Олегу Федоровичу Васильеву — 90 лет) 115

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE
OF RUSSIAN FEDERATION

INTERNATIONAL ASSOCIATION
OF CONSTRUCTION
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

**NEWS OF HIGHER
EDUCATIONAL INSTITUTIONS**

CONSTRUCTION

№ 8 (680)
August 2015

**Scientific-theoretical journal
Published since March 1958
Monthly**

Editor-in-Chief V.G. Sebeshev, PhD, Prof., Honour. Mem. RAACS

Editorial Board:

A.A. Afanasyev, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS
V.A. Vorobyov, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS
V.A. Ignatyev, DSc (Eng), Prof.
V.I. Kostin, DSc (Eng), Prof. (Deputy Editor-in-Chief)
G.B. Lebedev, PhD, As. Prof. (Deputy Editor- in-Chief)
L.S. Lyakhovich, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS
V.I. Morozov, DSc (Eng), Prof.
Yu.P. Panibratov, DSc (Econ), Prof., Acad. RAACS
Yu.P. Pravdivets, DSc (Eng), Prof.
V.G. Sebeshev, PhD, Prof., Honour. Mem. RAACS
Yu.A. Feofanov, DSc (Eng), Prof.
Ye.M. Chernyshov, DSc (Eng), Prof., Acad. RAACS

Responsible secretary N.V. Bitkina

The editorial office's address:
113 Leningradskaya St. Novosibirsk 630008
Phone number/fax +7 (383)266 28 59
www.sibstrin.ru E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

© P u b l i s h e r NSUACE (Sibstrin), 2015

CONTENTS

THE THEORY OF ENGINEERING STRUCTURES

Dukart A.V. Determination of steady state vibrations of linear system under periodic excitation 5

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Selyaev V.P., Sedova A.A., Kupriyashkina L.I., Osipov A.K. Effect of the concentration of phosphoric acid and the degree of filling of zeolite-containing rocks on the strength of cement stone 13

Berdov G.I., Vinogradov S.A., Mashkin A.N., Khritankov V.F. Dielcometric analysis of influence electrolyte solution on the properties of cement materials 21

Kuznetsova I.N., Kosach A.F., Rashchupkina M.A., Gutareva N.A. Influence of the main minerals of the cement stone on its structure and properties 25

Abdrakhimov V.Z., Roshchupkina I.Yu., Abdrakhimova E.S., Kayrakbaev A.K., Kolpakov A.V. Heat-resistant composite based phosphate binding and highalumina waste ... 33

ECONOMICS AND MANAGEMENT OF CONSTRUCTION AUTOMATION AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY

Avdeev Yu.V., Kononov A.D., Kononov A.A., Vardanyan N.A. To a problem of signal proces-

sing of a navigator at self-acting full remote control by machines of a road-building complex 41

HYDROTECHNICAL CONSTRUCTION

Atavin A.A., Degtyarev V.V., Yanenko A.P. Unsteady processes in navigable hydraulic structures 47

BUILDING AND ROAD MACHINES

Abramenkov D.E., **Abramenkov E.A.**, **Dedov A.S.**, **Dmitriev M.P.**, **Malyshev M.S.**, **Olziybayar Choen.** Pneumatic percussion mechanism with a bypass between the chambers of the working and idling, and its physical and mathematical description 57

SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION

Adishchev V.V., Karpov E.V., Demeshkin A.G., Karpitskaya Yu.R., Maltsev V.V., Ivanov A.I. Use of optical system of Correlated Solutions Vic 3d for creation of diagrams of deformation of concrete 68

Bukreev V.I., Degtyarev V.V., Chebotnikov A.V. Effect of non-monotonic dependence of the density on the temperature on the movement of salt water 82

Vysotskiy L.I. Notes on the definition of the equivalent roughness 88

Gnyrya A.I., **Korobkov S.V.**, **Mokshin D.I.**, **Koshin A.A.**, **Gauss K.S.**, **Anoshkina O.O.**, **Terekhov V.I.** Heat transfer model of the system of the building. Part 1. Detached prism different heights 97

Knyazeva I.A., **Zolotonosov Ya.D., Lisovskiy V.A.** Production of spring-twisted channel of heat exchangers by laser welding 106

JUBILEE'S ARTICLY

The outstanding scientist of the international scale in the field of hydrodynamics (Oleg Fedorovich Vasilyev — 90 years) 115

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 624.042 : 534.14

А.В. ДУКАРТ

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ УСТАНОВИВШИХСЯ КОЛЕБАНИЙ ЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ВОЗМУЩАЮЩЕЙ НАГРУЗКЕ

На примере консервативной системы с одной степенью свободы рассматривается задача построения стационарных режимов движения при периодических воздействиях общего вида. Предполагается, что функция возмущающей нагрузки удовлетворяет условиям Дирихле. Получено точное решение задачи, основанное на использовании реакции системы на действие единичной ступенчатой нагрузки. В качестве примеров найдены законы движения системы при «пилообразной» нагрузке и воздействии типа «прямоугольный синус».

Ключевые слова: консервативная система, степень свободы, произвольная периодическая нагрузка, установившиеся колебания, стационарные режимы, периодическое решение.

В инженерной практике наряду с гармоническими воздействиями широко распространены периодические возмущающие нагрузки, носящие достаточно сложный характер изменения во времени [1, 2]. В частности, во многих технических приложениях приходится иметь дело с кусочно-непрерывными и прерывными периодическими воздействиями. В этой связи в динамике строительных конструкций и сооружений, теории колебаний машин, виброударных и виброзащитных систем, систем автоматического регулирования и других областях повышенное внимание уделяется вопросам построения стационарных режимов движения.

Для определения периодических режимов движения различных систем разработаны точные и приближенные методы, в том числе основанные на разложении возмущающих нагрузок в ряды Фурье [3] и по формам собственных колебаний [4], использовании решения Дюффинга [5] и реакции системы на действие единичного мгновенного импульса [6, 7] и др. Для решения указанных задач можно воспользоваться также методами операционного исчисления [8], требующими достаточно сложного математического аппарата.

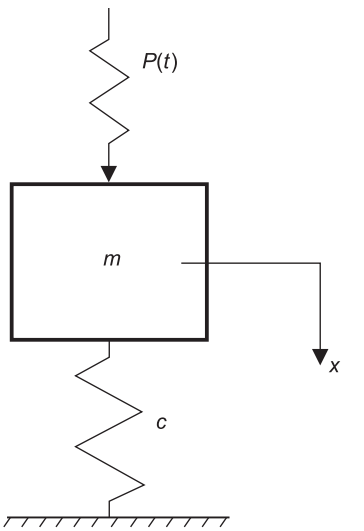


Рис. 1. Консервативная система с одной степенью свободы

В данной работе на примере консервативной системы с одной степенью свободы (рис. 1)

© Дукарт А.В., 2015

найдено точное решение задачи отыскания стационарных режимов движения, в основу которого положена реакция системы на действие единичной ступенчатой нагрузки [4, 7]. Предполагается, что внешнее воздействие на систему описывается периодическими функциями общего вида $P(t)$ периода T, которые на интервале времени $0 \le t \le T$ удовлетворяют так называемым условиям Дирихле [9], т.е. функции $P(t)$ являются функциями ограниченной вариации на каждом конечном интервале, на котором они ограничены и имеют конечное число экстремальных значений и точек разрыва первого рода. Принимается, что периодичность колебательных процессов является строгой и для любого момента времени t выполняется соотношение

$$P(t) - P(t+T) \equiv 0 .$$

Колебания рассматриваемой системы под действием заданной возмущающей нагрузки $P(t)$ описываются дифференциальным уравнением

$$\ddot{x}(t) + \omega^2 x(t) = \frac{1}{m} P(t) , \tag{1}$$

где $x(t)$ — отклонение массы m в произвольный момент времени t;
$\omega = \sqrt{c/m}$ — частота собственных колебаний;
c — коэффициент упругости системы.

Общее решение неоднородного уравнения (1) определяется [9] как сумма какого-либо его частного решения $x_*(t)$ и общего решения соответствующего (1) однородного уравнения при ненулевых значениях отклонения x_0 и скорости υ_0 массы m в начальный момент времени (при $t = 0$):

$$x(t) = x_*(t) + x_0 \cos\omega t + \frac{\upsilon_0}{\omega} \sin\omega t . \tag{2}$$

Для определения частного решения уравнения (1) воспользуемся функцией

$$R(t-\tau) = \frac{1}{c}[1 - \cos\omega(t-\tau)] , \tag{3}$$

определяющей колебания системы при $t \ge \tau$, вызываемые внезапным приложением единичной силы в момент времени $t = \tau$. Функция $R(t - \tau)$ называется реакцией системы на действие единичной ступенчатой нагрузки (на единичный скачок) [4, 7]. С учетом (3) для частного решения уравнения (1) имеем

$$x_*(t) = P(0)R(t) + \int_0^t \dot{P}(\tau)R(t-\tau)d\tau , \tag{4}$$

где $R(t)$ соответствует (3) при $\tau = 0$; точкой над $P(\tau)$ обозначена операция дифференцирования по τ (а далее также по t).

Подставляя (4) в (2), найдем общее решение уравнения (1), описывающее колебания рассматриваемой системы при произвольной возмущающей нагрузке:

$$x(t) = x_0 \cos\omega t + \frac{\upsilon_0}{\omega} \sin\omega t + P(0)R(t) + \int_0^t \dot{P}(\tau)R(t-\tau)d\tau . \tag{5}$$

Функция отклонений массы системы (5) справедлива для любых начальных условий движения.

Выразим функцию скорости $\dot{x}(t)$ колеблющейся массы системы. Для этого продифференцируем (5) по времени t:

$$\dot{x}(t) = -x_0\omega\sin\omega t + \upsilon_0\cos\omega t + P(0)\frac{dR(t)}{dt} + \int_0^t \dot{P}(\tau)\frac{dR(t-\tau)}{dt}d\tau. \qquad (6)$$

Из (3) следует

$$\frac{dR(t-\tau)}{dt} = \frac{\omega}{c}\sin\omega(t-\tau). \qquad (7)$$

С учетом (7) функции (5) и (6) принимают вид:

$$x(t) = x_0\cos\omega t + \frac{\upsilon_0}{\omega}\sin\omega t + \frac{1}{c}P(0)(1-\cos\omega t) + \frac{1}{c}\int_0^t \dot{P}(\tau)[1-\cos\omega(t-\tau)]d\tau,$$
$$\dot{x}(t) = -x_0\omega\sin\omega t + \upsilon_0\cos\omega t + \frac{\omega}{c}P(0)\sin\omega t + \frac{\omega}{c}\int_0^t \dot{P}(\tau)\sin\omega(t-\tau)d\tau. \qquad (8)$$

Обратимся теперь к непосредственному решению исходной задачи определения периодических режимов движения системы. Найдем сначала установившиеся колебания с периодом T возмущающей нагрузки $P(t)$. В этом случае решение (8) должно иметь тот же период колебаний, что и заданная нагрузка, т.е. должно быть подчинено условиям периодичности:

$$x(0) = x(T);\ \dot{x}(0) = \dot{x}(T). \qquad (9)$$

Вводя обозначения для постоянных величин

$$U_0 = \int_0^T \dot{P}(\tau)\cos\omega\tau\, d\tau;\quad V_0 = \int_0^T \dot{P}(\tau)\sin\omega\tau\, d\tau$$

и учитывая, что

$$\int_0^t \dot{P}(\tau)d\tau = P(\tau)\big|_0^t = P(t) - P(0),$$

выразим отклонения и скорости массы m в моменты времени $t = 0$ и $t = T$:

$$x(0) = x_0;\ \dot{x}(0) = \upsilon_0 + \frac{1}{c}\dot{P}(0);$$

$$x(T) = x_0\cos\omega T + \frac{\upsilon_0}{\omega}\sin\omega T + \frac{1}{c}[P(T) - P(0)\cos\omega T] - \frac{1}{c}(U_0\cos\omega T + V_0\sin\omega T);$$

$$\dot{x}(T) = -x_0\omega\sin\omega T + \upsilon_0\cos\omega T + \frac{1}{c}[\dot{P}(T) + P(0)\omega\sin\omega T] + \frac{\omega}{c}(U_0\sin\omega T - V_0\sin\omega T). \qquad (10)$$

Подставляя (10) в условия (9), получим систему двух алгебраических уравнений относительно неизвестных x_0 и υ_0, решив которую, найдем

$$x_0 = \frac{1}{2c}\left\{P(T) + P(0) + U_0 + \frac{1}{\omega}[\dot{P}(T) - \dot{P}(0) - \omega V_0]\operatorname{ctg} 0{,}5\omega T\right\};$$

$$\upsilon_0 = \frac{1}{2c}\left\{\dot{P}(T) - \dot{P}(0) + \omega V_0 + \omega[P(0) - P(T) + U_0]\operatorname{ctg} 0{,}5\omega T\right\}. \qquad (11)$$

Внесем (11) в первое из выражений (8). В результате несложных преобразований найдем искомое периодическое решение в виде

$$x(t) = \frac{1}{c}\left\langle P(t) - \left[P(0) + \int_0^t \dot{P}(\tau)\cos\omega\tau d\tau\right]\cos\omega t - \sin\omega t\int_0^t \dot{P}(\tau)\sin\omega\tau d\tau + \right.$$

$$+\frac{1}{2\sin 0{,}5\omega T}\left\{[P(0) + U_0]\sin\omega(t + 0{,}5T) + \frac{1}{\omega}[\dot{P}(T) - \dot{P}(0)]\cos\omega(t - 0{,}5T) - \right. \qquad (12)$$

$$\left.\left. - P(T)\sin\omega(t - 0{,}5T) - V_0\cos\omega(t + 0{,}5T)\right\}\right\rangle.$$

Полученное решение определяет движение массы системы в интервале $0 \le t \le T$. Отметим, что выражение (12), удовлетворяющее условиям (9), является периодическим с периодом *T*, так как дифференциальное уравнение (1) не изменяет своего вида при замене *t* на *t* + *T*, а начальные условия движения массы, согласно (9), также одинаковы для моментов времени *t* = 0 и *t* = *T*. Зная закон движения массы для интервала времени [0, *T*], можно вследствие периодичности решение (12) без изменений сместить в соседние промежутки времени [*T*, 2*T*], [2*T*, 3*T*] и т.д.

В качестве примера использования решения (12) найдем закон стационарных колебаний консервативной системы с одной степенью свободы, вызываемые «пилообразной» периодической возмущающей нагрузкой (рис. 2).

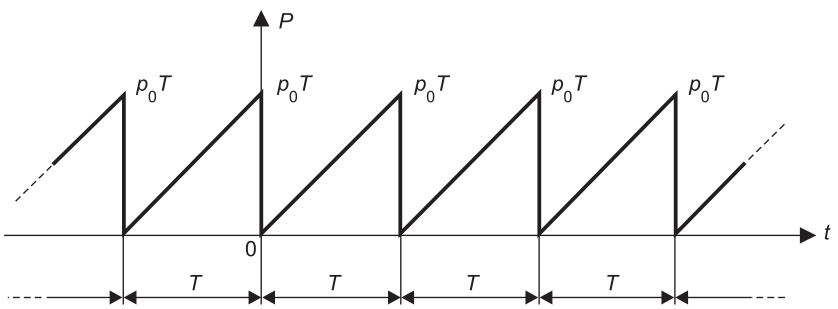


Рис. 2. «Пилообразная» возмущающая нагрузка

Такая нагрузка в диапазоне времени $[0^-, T^+]$ описывается линейной функцией $P(t) = p_0 t$; знаками «–» и «+» обозначены моменты времени непосредственно до и после скачкообразного изменения нагрузки при $t = \pm kT$, где *k* = 0, 1, 2, 3, ...

Для рассматриваемого воздействия имеем:

$$P(0) = 0;\ P(T) = p_0 T;\ \dot{P}(t) = \dot{P}(0) = \dot{P}(T) = p_0;$$

$$U_0 = \int_0^T \dot{P}(\tau)\cos\omega\tau\, d\tau = \frac{p_0}{\omega}\sin\omega T;\ V_0 = \int_0^T \dot{P}(\tau)\sin\omega\tau\, d\tau = \frac{p_0}{\omega}(1 - \sin\omega T); \qquad (13)$$

$$\int_0^t \dot{P}(\tau)\cos\omega\tau\, d\tau = \frac{p_0}{\omega}\sin\omega t\ ;\ \int_0^t \dot{P}(\tau)\sin\omega\tau\, d\tau = \frac{p_0}{\omega}(1-\sin\omega t)\,.$$

Подставляя (13) в (12), после элементарных упрощений получим замкнутую форму периодического решения задачи

$$x(t) = \frac{p_0}{c}[t + 0,5T(\cos\omega t - \mathrm{ctg}0,5\omega T\sin\omega t)]\,. \tag{14}$$

Для определения функции скорости колебаний массы системы продифференцируем уравнение движения (14) по времени:

$$\dot{x}(t) = \frac{p_0}{c}[1 - 0,5\omega T(\sin\omega t + \mathrm{ctg}0,5\omega T\cos\omega t)]\,.$$

Рассмотрим частный случай периодической возмущающей нагрузки $P(t)$ периода *T*, изменяющей знак через полупериод, т.е. удовлетворяющей для любого момента времени *t* условию

$$P(t) + P(t + 0,5T) \equiv 0\,.$$

Стационарное решение $x(t)$ дифференциального уравнения колебаний (1), соответствующее такому воздействию, должно удовлетворять условиям периодичности следующего вида:

$$x(0) = -x(0,5T)\ ;\ \dot{x}(0) = -\dot{x}(0,5T)\,. \tag{15}$$

Условия (15) с учетом выражений (8), определяющих движение массы *m*, приводят к системе двух алгебраических уравнений относительно x_0 и υ_0, из решения которой найдем

$$x_0 = \frac{1}{2c}\left\{P(0) - P(0,5T) + U + \frac{1}{\omega}[\dot{P}(0) + \dot{P}(0,5T) + V]\mathrm{tg}0,25\omega T\right\};$$

$$\upsilon_0 = \frac{1}{2c}\left\{\omega V - \dot{P}(0) - \dot{P}(0,5T) - \omega[P(0) + P(0,5T) + U]\mathrm{tg}0,25\omega T\right\}. \tag{16}$$

Здесь

$$U = \int_0^{0,5T} \dot{P}(\tau)\cos\omega\tau\, d\tau;\quad V = \int_0^{0,5T} \dot{P}(\tau)\sin\omega\tau\, d\tau.$$

Подставляя (16) в (8), найдем периодический режим движения системы в интервале $0 \le t \le 0,5T$:

$$\begin{aligned} x(t) = \frac{1}{c}\Bigg\langle & P(t) - [P(0) + \int_0^t \dot{P}(\tau)\cos\omega\tau d\tau]\cos\omega t - \sin\omega t\int_0^t \dot{P}(\tau)\sin\omega\tau d\tau + \\ & + \frac{1}{2\cos 0,25\omega T}\{[P(0) + U]\cos\omega(t + 0,25T) - P(0,5T)\cos\omega(t - 0,25T) - \\ & - \frac{1}{\omega}[\dot{P}(0) + \dot{P}(0,5T)]\sin\omega(t - 0,25T) + V\sin\omega(t + 0,25T)\}\Bigg\rangle. \end{aligned} \tag{17}$$

Для определения движения системы в промежутке времени [0,5T; T] необходимо решение (17) продолжить нечетным образом:

$$x(t+0,5T)=-x(t)\,.$$

Далее, как и выше, следует колебания системы в интервале $0 \le t \le T$ на основании периодичности движения повторить в промежутках времени [T, 2T], [2T, 3T] и т.д.

В качестве примера реализации решения (17) рассмотрим установившиеся колебания одномассовой консервативной системы при действии периодической возмущающей нагрузки типа «прямоугольный синус», определяемой в интервале времени [0, T], как и для любого другого цикла, выражением (рис. 3)

$$P(t)=\begin{cases} P_0 \text{ при } 0^+ \le t \le 0,5T^-, \\ -P_0 \text{ при } 0,5T^+ \le t \le T^-. \end{cases} \tag{18}$$

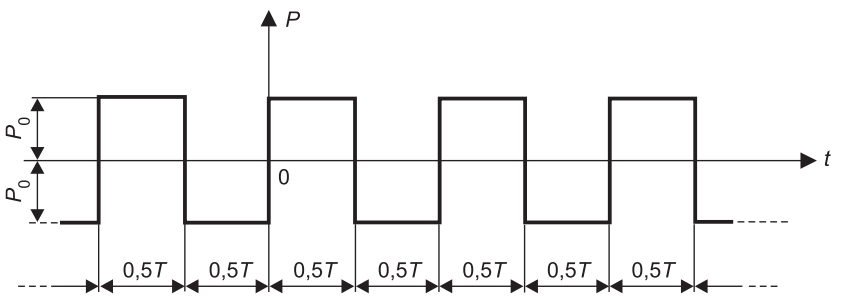


Рис. 3. Воздействие типа «прямоугольный синус»

Здесь, как и в первом примере, знаками «–» и «+» обозначены моменты времени непосредственно до и после скачкообразного изменения воздействия (в данном случае при $t=\pm 0,5kT$; k = 0, 1, 2, 3, ...).

Для воздействия (18) имеем:

$$P(t)=P(0)=P(0,5T)=P_0\,;\ \dot{P}(t)=\dot{P}(0)=\dot{P}(0,5T)=0\,; \tag{19}$$

$$U=0\,;\ V=0\,;\ \int_0^t \dot{P}(\tau)\cos\omega\tau\, d\tau=0\,;\ \int_0^t \dot{P}(\tau)\sin\omega\tau\, d\tau=0\,.$$

Внесем (19) в уравнение (17); в результате упрощений найдем искомое периодическое решение задачи в замкнутой форме

$$x(t)=\frac{P_0}{c}(1-\cos\omega t-\mathrm{tg}0,25\omega T\sin\omega t)\,. \tag{20}$$

Функция скорости массы определяется выражением

$$\dot{x}(t)=\frac{P_0\omega}{c}(\sin\omega t-\mathrm{tg}0,25\omega T\cos\omega t)\,. \tag{21}$$

В полупериоде [0,5T; T] следует в уравнениях (20) и (21) вместе с возмущающей нагрузкой сменить знак на противоположный.

Как следует из приведенных примеров, несмотря на кажущуюся громоздкость полученных уравнений периодических режимов движения системы (12) и (17) они быстро приводят к замкнутым формам решений (14) и (20), совпадающим с известными результатами [7, 10]. Они значительно более удобны для последующих вычислений, чем при использовании, например, разложения возмущающих нагрузок в ряды Фурье [3]. Отметим, что уравнения движения в виде (12) и (17) особенно удобны при аппроксимации внешних воздействий кусочно-постоянными и кусочно-линейными функциями; в этих случаях бóльшая часть слагаемых уравнений (12) и (17) обращается в нуль. Найденные решения (12) и (17) могут оказаться полезными и для других типов возмущающих нагрузок. Кроме того, предложенный подход может быть обобщен на более сложные линейные системы, в том числе неконсервативные.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вибрации в технике [Текст]: справочник. Т. 4. Вибрационные процессы и машины; под ред. Э.Э. Лавендела. — М. : Машиностроение, 1981. — 509 с.
2. Динамический расчет зданий и сооружений [Текст]: справочник проектировщика; под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. — М. : Стройиздат, 1984. — 303 с.
3. Тимошенко, С.П. Колебания в инженерном деле [Текст] / С.П. Тимошенко. — М. : КомКнига, 2007. — 440 с.
4. Бидерман, В.Л. Теория механических колебаний [Текст] / В.Л. Бидерман. — М. : Высшая школа, 1980. — 408 с.
5. Обморшев, А.Н. Вынужденные колебания системы с одной степенью свободы в случае прерывного изменения возмущающей силы [Текст] / А.Н. Обморшев / Моск. механико-машиностроит. ин-т им. Баумана. Вып. 65/5. — М.-Л. : Машгиз, 1940. — 51 с.
6. Дукарт, А.В. Об установившихся колебаниях двухмассовой системы с демпфированием при произвольной периодической возмущающей нагрузке [Текст] / А.В. Дукарт // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 3–4. — С. 3–13.
7. Пановко, Я.Г. Введение в теорию механических колебаний [Текст] / Я.Г. Пановко. — М. : Наука, 1971. — 240 с.
8. Лурье, А.И. Операционное исчисление и его приложения к задачам механики [Текст] / А.И. Лурье. — М. : ГИТТЛ, 1950. — 432 с.
9. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. — М. : Наука, 1973. — 832 с.
10. Пановко, Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара [Текст] / Я.Г. Пановко. — Л. : Политехника, 1990. — 272 с.

ДУКАРТ Адам Вилебальдович, д-р техн. наук, проф.
Московский государственный строительный университет

Получено 21.07.15

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

DETERMINATION OF STEADY STATE VIBRATIONS OF LINEAR SYSTEM UNDER PERIODIC EXCITATION

Steady state oscillations of linear systems with an arbitrary periodic force are considered on the example of a conservative system with one degree of freedom. It is assumed that the function, describing the exciting force, satisfies the Dirichlet conditions. The analytical solution is obtained

using the system response to action of the unit step load. As examples, motion of the system under ramp and rectangular-sine like loads is found.

Key words: conservative system, degree of freedom, arbitrary periodic load, steady state vibration, stationary modes, periodic solution.

REFERENCES

1. Vibration in technique [Text]: handbook. Vol. 4: Vibration processes and mashines / ed. by E.E. Lavendel. — M. : Mashinostroenie, 1981. — 509 p.
2. Dynamic analysis of buildings and structures [Text]: designer's handbook; ed. by B.G. Korenev, I.M. Rabinovich. — M. : Stroyizdat, 1984. — 303 p.
3. Timoshenko, S.P. Vibration problems in engineering [Text] / S.P. Timoshenko. — M. : KomKniga, 2007. — 440 p.
4. Biderman, V.L. Theory of mechanical vibrations [Text] / V.L. Biderman. — M. : Vysshaya shkola, 1980. — 408 p.
5. Obmorshev, A.N. Forced vibration of one degree of freedom system in case of discontinuous variation of exciting force [Text]/A.N. Obmorshev// Bauman Moscow Institute of Mechanics and Machine Building. Edition 65/5. — M.; L. : Mashgiz, 1940. — 51 p.
6. Dukart, A.V. On periodic oscillations of a two-mass damped system with an arbitrary exciting force [Text] / A.V. Dukart // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 3–4. — P. 3–13.
7. Panovko, Ya.G. Introduction to the theory of mechanical oscillations [Text] / Ya.G. Panovko. — M. : Nauka, 1971. — 240 p.
8. Lurie, A.I. Operational calculus and its applications to problems of mechanics [Text] / A.I. Lurie. — M. : GITTL, 1950. — 432 p.
9. Korn, G. Mathematics nahdbook for scientists and engineers [Text] / G. Korn, T. Korn. — M. : Nauka, 1973. — 832 p.
10. Panovko, Ya.G. Basics of applied theory of vibrations and impact [Text]/ Ya.G. Panovko. — L. : Politekhnika, 1990. — 272 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.54 : 678.06 : 620.193

В.П. СЕЛЯЕВ, А.А. СЕДОВА, Л.И. КУПРИЯШКИНА, А.К. ОСИПОВ

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ И СТЕПЕНИ НАПОЛНЕНИЯ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩЕЙ ПОРОДЫ НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Изучено влияние фосфорной кислоты различной концентрации и времени экспонирования цементного камня в модельных растворах на их прочность. Получены кинетические зависимости pH во время экспонирования цементного камня в агрессивной среде. Проанализированы повреждения материалов при взаимодействии с агрессивной средой. Установлен состав осадка, выделенного из образцов. Определена прочность цементного камня, наполненного цеолитсодержащей породой, после экспонирования в растворах фосфорной кислоты.

Ключевые слова: прочность, цеолитсодержащие породы, коррозионная стойкость, раствор, фосфорная кислота, концентрация, наполнитель, цементный камень.

За последние годы строительная индустрия развивается быстрыми темпами. Особенно бурно развивается производство различного вида бетонов, обладающих заданным набором эксплуатационных и физико-механических характеристик. При этом большое значение приобретают технологии производства бетонов, основанные на экономии ресурсов как материальных, так и энергетических. Перспективны направления исследований, связанных с разработкой бетонов, обеспечивающих снижение расхода цемента [1–6].

Широкое применение находят в производстве строительных материалов цеолитсодержащие породы, которые наряду с экономией цемента на 20–30 % позволяют улучшить ряд свойств бетонов. Значительно повышается коррозионная стойкость, морозостойкость, прочность [3, 7, 8].

Задача настоящей работы — изучение процессов взаимодействия цементного камня, наполненного ЦСП на 10, 20, 30 %, с растворами фосфорной кислоты различной концентрации. Проблема повреждения строительных материалов под воздействием агрессивных сред в настоящее время весьма актуальна. Свободные кислоты встречаются в сточных водах промышленных предприятий. Кислотная среда может возникнуть также при конденсации на поверхности конструкций влаги, если в атмосфере содержатся агрессивные вещества. Такая атмосфера характерна для современных промышленных центров. Поэтому необходимо знать процессы, возникающие при кислотной коррозии бетона [1, 3, 9].

Исследования проводились по следующей методике: готовые образцы (5 штук) массой 17,5 г каждый, на цементном связующем М 400, со степенью наполнения 10, 20, 30 % ЦСП помещали в емкость, заливали раство-

© Селяев В.П., Седова А.А., Куприяшкина Л.И., Осипов А.К., 2015

ром ортофосфорной кислоты (0,5; 1,5; 2,5%-й концентрации объемом 350 мл) и выдерживали 7, 14, 28 сут. Затем композиты извлекали из раствора, подсушивали на воздухе на фильтровальной бумаге для удаления лишней жидкости и испытывали на прочность при сжатии. Фильтрат анализировали на содержание ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} методом ионной хроматографии на ионном анализаторе PIA-1000. Содержание ионов Al^{3+} и оксида кремния определяли спектрофотометрическим методом. Элементный анализ осадков, выделенных из цементного камня в процессе экспонирования в растворах кислоты, определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре ARL «Porform-4200». Кислотность растворов контролировали с помощью pH-метра «Эксперт-pH».

Установлен вид и характер кинетических зависимостей pH. Из кинетических кривых рис. 1, *а–г* видно, что pH растворов незначительно изменяется в сторону повышения в первые 7–8 сут. Максимальная величина pH в 0,5%-й кислоте составляет 5,0–5,2; в 1,5%-й — 4,0–4,5; в 2,5%-й кислоте — 3,0–3,5 независимо от степени наполнения цементного камня ЦСП.

При более длительном контакте цементного камня с фосфорной кислотой 14–28 сут pH раствора меняется незначительно, можно полагать, что в системе наступает химическое равновесие. Вероятно, при контакте бетона с водным раствором фосфорной кислоты происходит разрушение силиката кальция, особенно в первые дни контакта (7–8 сут) с образованием гидроксида кальция, что должно привести к значительному повышению pH раствора. Гидроксид кальция, образующийся из цементного камня под действием воды, нейтрализуется кислотой с образованием малорастворимого фосфата $Ca_3(PO_4)_2$ или кислых солей кальция $CaHPO_4$, $Ca(H_2PO_4)_2$ в более кислых средах:

$$3CaO \cdot SiO_2 + 2H_3PO_4 + (n\text{-}3)H_2O \rightarrow Ca_3(PO)_2\downarrow + SiO_2 \cdot nH_2O\downarrow + 3H_2O.$$

Фосфат кальция и гель кремниевой кислоты почти полностью остаются в порах бетона, вызывая их частичное закупоривание (кольматацию), что приводит к торможению процесса коррозии бетона (самотормозящийся процесс). Чем больше образуется фосфата кальция и геля кремниевой кислоты, тем плотнее и менее проницаемым становится бетон для ионов кальция, тем сильнее тормозится процесс коррозии во времени [3].

По истечении 7, 14, 28 сут композиты вынимали из раствора, подсушивали на воздухе и испытывали образцы на прочность при сжатии. Растворы отделяли от осадка фильтрованием. Полученные фильтраты анализировали на содержание ионов Ca^{2+}, Mg^{2+}, Al^{3+} и оксида кремния.

В табл. 1 представлены результаты анализа фильтрата после выдерживания цементного камня в растворах H_3PO_4. Данные табл. 1 свидетельствуют, что содержание ионов кальция в фильтрате увеличивается с повышением концентрации кислоты. Вероятно, это связано с образованием кислых солей $Ca(H_2PO_4)_2$, $CaHPO_4$.

Снижение свободных ионов кальция в фильтрате после увеличения продолжительности контакта «камень–кислота», по-видимому, связано с

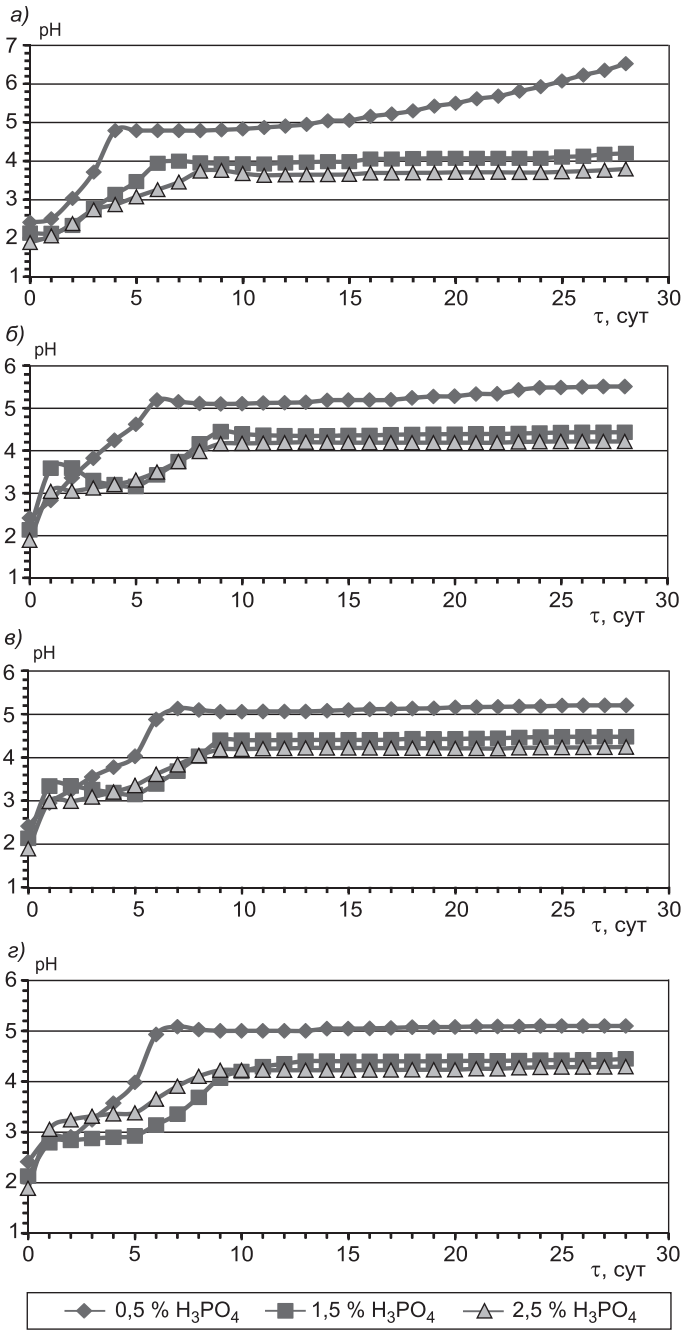


Рис. 1. Динамика изменения pH среды при выдерживании цементного камня в растворах ортофосфорной кислоты различной концентрации в течение 28 сут. Содержание ЦСП в цементном камне: *а*) 0 %; *б*) 10 %; *в*) 20 %; *г*) 30 %

явлением самоторможения процесса коррозии камня за счет увеличения образования осадка фосфата кальция и геля кремниевой кислоты. Содержание SiO_2 в фильтрате возрастает с увеличением концентрации H_3PO_4, что, вероятно, связано с повышением растворимости кремниевой кислоты с увеличением кислотности раствора.

Таблица 1. **Результаты анализа фильтрата после выдержки цементного камня, наполненного ЦСП, в растворах ортофосфорной кислоты различной концентрации**

W, % H_3PO_4	ЦСП, %	$X_{ср}$, мг/л								
		7 сут			14 сут			28 сут		
		Ca^{2+}	SiO_2	Al^{3+}	Ca^{2+}	SiO_2	Al^{3+}	Ca^{2+}	SiO_2	Al^{3+}
0,5	10	9,17	211,30	2,18	22,71	286,07	2,27	23,06	206,02	2,23
	20	9,41	260,10	2,13	43,81	221,94	2,09	37,83	208,08	2,27
	30	9,22	289,08	2,18	43,29	230,06	2,08	464,13	210,15	2,41
1,5	10	10,66	676,14	4,39	147,43	694,04	2,91	143,53	590,11	2,85
	20	8,1	659,02	4,75	179,79	1048,90	3,10	143,37	550,07	2,71
	30	4,25	697,04	4,93	168,21	685,13	3,17	160,61	574,09	2,93
2,5	10	306,10	1117,05	4,89	326,14	1096,03	4,18	258,04	834,20	3,69
	20	297,89	1053,21	7,04	311,87	993,21	4,17	275,76	1004,30	3,87
	30	296,73	1110,06	4,75	294,90	975,78	4,18	235,92	1142,26	3,63

Содержание ионов Al^{3+} в фильтрате невысокое, но просматривается повышение его концентрации с увеличением кислотности раствора.

В процессе выдерживания цементного камня в растворах H_3PO_4 наблюдали помутнение раствора и выпадение осадка на дне сосуда. Количество осадка увеличивалось с повышением времени контакта и увеличением концентрации кислоты.

В табл. 2 представлены экспериментальные данные по определению массы осадка, которые свидетельствуют об увеличении массы осадка по мере увеличения степени наполнения ЦСП, времени контакта цементного камня с фосфорной кислотой и концентрации кислоты. По изменению массы осадка сделан вывод, что процесс коррозии бетона усиливается по мере увеличения степени наполнения ЦСП до 30 % и концентрации кислоты до 2,5 %.

Элементный анализ осадка (табл. 3) свидетельствует, что он состоит из оксидов кремния, фосфора, кальция, в меньшей мере из оксидов алюминия

Таблица 2. **Масса осадка, полученного при выдерживании цементного камня в растворах фосфорной кислоты**

$C(H_3PO_4)$, %	τ, сут	ЦСП, %	$m_{ос}$, г	τ, сут	ЦСП, %	$m_{ос}$, г	τ, сут	ЦСП, %	$m_{ос}$, г
0,5	7	0	—	14	0	—	28	0	0,0417
		10	—		10	0,0025		10	0,0074
		20	—		20	0,0080		20	0,0233
		30	—		30	0,0325		30	0,1143
1,5		0	0,0446		0	0,0964		0	0,4091
		10	0,0660		10	0,3171		10	0,4219
		20	0,0869		20	0,7042		20	0,7540
		30	0,0807		30	1,1969		30	1,5076
2,5		0	0,0663		0	0,1787		0	0,1149
		10	0,3496		10	0,7940		10	1,1124
		20	0,9851		20	1,4624		20	1,7158
		30	1,2935		30	2,8352		30	3,6967

Таблица 3. **Результаты анализа осадка, полученного после выдержки цементного камня, наполненного ЦСП, в растворах ортофосфорной кислоты различной концентрации, по данным рентгенофлуоресцентного метода**

τ, сут	*W*, % H_3PO_4	ЦСП, %	Содержание оксидов, %								
			SiO_2	P_2O_5	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	Na_2O	TiO_2	MgO
7	1,5	10	55,90	27,80	—	9,16	5,41	—	0,36	—	0,25
		20	51,54	23,76	5,97	10,13	5,64	1,39	0,21	0,59	0,45
		30	51,25	24,15	6,46	9,02	5,91	1,57	0,24	0,69	0,42
	2,5	10	46,94	26,54	6,94	8,46	7,70	1,63	0,24	0,78	0,32
		20	50,11	23,78	6,27	8,93	7,69	1,52	0,29	0,77	0,36
		30	50,38	23,75	6,17	8,98	7,31	1,61	0,23	0,78	0,42
14	0,5	20	39,44	27,40	17,86	7,79	3,13	1,14	0,85	0,52	0,51
		30	43,32	24,55	14,13	9,32	4,51	1,34	0,52	0,99	0,49
	1,5	10	45,16	29,18	9,35	7,34	5,90	1,44	0,22	0,67	—
		20	45,14	26,19	10,94	8,14	6,61	1,40	—	0,71	0,31
		30	40,31	30,02	13,25	7,37	6,15	1,40	0,22	0,66	0,28
	2,5	10	45,78	28,81	10,95	6,50	5,44	1,12	0,29	0,62	—
		20	40,22	30,41	13,16	7,23	6,15	1,24	0,26	0,65	0,24
		30	36,62	32,69	15,51	6,80	5,89	1,28	—	0,58	0,25

и железа. В незначительном количестве содержатся оксиды калия, магния, натрия, титана. Содержание перечисленных оксидов зависит от концентрации кислоты, ЦСП, продолжительности контакта цементного камня с кислотой.

Содержание оксида кальция в осадке повышается по мере увеличения времени контакта цементного камня с кислотой, что, вероятно, связано с увеличением фосфата кальция в осадке.

Содержание SiO_2 в осадке уменьшается по мере увеличения продолжительности контакта камня с кислотой, что связано с увеличением растворимости SiO_2 в кислых средах.

Цементный композиционный материал представляет собой капиллярно-пористое тело, структура которого зависит от водоцементного соотношения, объемной концентрации наполнителя и цемента.

Удобоукладываемость бетонной смеси определяется количеством воды затворения, увеличение которой в значительной степени ухудшает прочностные свойства готовых изделий. В настоящей работе образцы, наполненные и ненаполненные ЦСП, погружали в водный раствор фосфорной кислоты и наблюдали за изменением массы цементного камня во времени. Установлено, что композиты без наполнения ЦСП (рис. 2) медленно набирают массу в течение 14 сут, а затем происходит ее снижение. Вероятно, нарастание массы происходит вследствие появления новообразований, которые приводят к заполнению и закупориванию пор, что вызывает уплотнение поверхностных слоев образцов и временное увеличение прочности (табл. 4). Затем происходит снижение массы, что связано, скорее всего, с разрушением пор в наружных слоях образцов, вызванных проявлением критических

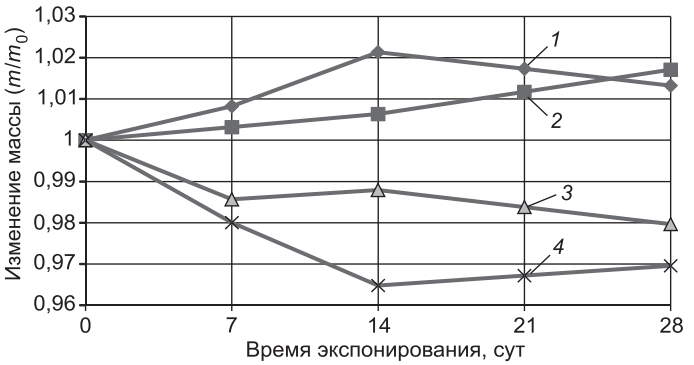


Рис. 2. Влияние содержания наполнителя на изменение массы цементных композитов, обработанных 2,5%-й фосфорной кислотой

Процент наполнения: *1* — 0; *2* — 10; *3* — 20; *4* — 30

напряжений в них, возникших при накапливании большого количества новообразований. Это приводит к появлению осадка (см. табл. 2) и, как следствие, понижению прочности цементного камня. В композитах с наполнителем набор и снижение массы согласуются со степенью наполнения ЦСП. При степени наполнения на 10 % происходит незначительное нарастание массы в течение всего времени контакта «камень–кислота». В композитах со степенью наполнения ЦСП на 20–30 % наблюдается снижение массы во времени, что, вероятно, связано с размокаемостью ЦСП и приводит к выделению глинистой составляющей и, как следствие, понижению прочности цементного камня.

Прочность на сжатие цементных образцов определяли по величине разрушающей нагрузки. Результаты испытаний композитов на прочность после экспонирования в модельных растворах фосфорной кислоты представ-

Таблица 4. **Результаты определения средней прочности на сжатие после выдержки цементного камня в растворах фосфорной кислоты**

$C(H_3PO_4)$ = 0,5 %			$C(H_3PO_4)$ = 1,5 %		$C(H_3PO_4)$ = 2,5 %	
τ, сут	ЦСП, %	$\overline{R}_{сж}$, МПа	ЦСП, %	$\overline{R}_{сж}$, МПа	ЦСП, %	$\overline{R}_{сж}$, МПа
7	0	62,15	0	62,28	0	56,02
	10	67,15	10	70,40	10	53,54
	20	60,57	20	49,54	20	57,92
	30	73,11	30	57,57	30	43,59
14	0	57,13	0	58,24	0	43,19
	10	59,39	10	59,78	10	54,30
	20	49,38	20	59,84	20	53,92
	30	54,92	30	51,33	30	38,19
28	0	61,96	0	52,57	0	41,83
	10	55,37	10	48,80	10	47,96
	20	53,75	20	42,69	20	44,00
	30	55,02	30	38,68	30	35,02

лены в табл. 4. Экспериментальные данные свидетельствуют, что прочность материала зависит от концентрации кислоты, от степени наполнения ЦСП и времени контакта «цементный камень–кислота».

Прочность цементных композитов понижается с увеличением каждого перечисленного параметра. Опираясь на данные, можно сделать вывод, что наиболее эффективным вариантом использования цеолитсодержащих пород являются образцы со степенью наполнения ЦСП на 10 %, так как у них наибольшая прочность при любой концентрации фосфорной кислоты на протяжении всего времени экспонирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соломатов, В.И. Химическое сопротивление материалов. 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / В.И. Соломатов, В.П. Селяев, Ю.А. Соколова. — М. : РААСН, 2001. — 284 с.
2. Селяев, В.П. Оценка долговечности, остаточного ресурса железобетонных конструкций, подверженных действию жидких агрессивных сред. Бетон и железобетон — взгляд в будущее [Текст] / В.П. Селяев, П.В. Селяев, Е.В. Сорокин // Науч. труды III Всерос. (II Междунар.) конф. по бетону и железобетону (Москва, 12–16 мая 2014 г.): в 7 т. Т. 3. Арматура и система армирования. Фибробетоны и армоцементы. Проблемы долговечности. — М. : МГСУ, 2014. — С. 399–415.
3. Селяев, В.П. Влияние цеолитсодержащих наполнителей на прочность и пористость цементных композитов [Текст] / В.П. Селяев, В.А. Неверов, Л.И. Куприяшкина // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 6. — С. 36–44.
4. Седова, А.А. Изучение процессов повреждения цементного камня растворами карбоновых кислот [Текст] / А.А. Седова, В.М. Иванов, В.П. Селяев, Р.А. Полянсков, А.К. Осипов, Л.И. Куприяшкина // Вестник Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. — 2014. — Т. 55, № 5. — С. 296–301.
5. Селяев, В.П. Изучение процессов повреждения цементного камня, наполненного цеолитсодержащей породой, растворами хлористоводородной кислоты [Текст] / В.П. Селяев, А.А. Седова, Л.И. Куприяшкина, А.К. Осипов, Е.И. Куприяшкина // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 7. — С. 32–38.
6. Селяев, В.П. Комплексное изучение процессов повреждения цементного камня растворами карбоновых кислот [Текст] / В.П. Селяев, А.А. Седова, Л.И. Куприяшкина, А.К. Осипов // Изв. вузов. Строительство. — 2013. — № 8. — С. 34–41.
7. Papke, K.G. Erionite and other associated zeolites in Nevada [Текст] / K.G. Papke // Nevada Bureau of Mines and Geology. Bull. 79. — Reno : University of Nevada, 1972. — 32 p.
8. Брэк, Д. Цеолитовые молекулярные сита [Текст] / Д. Брэк; пер. с англ. — М. : Мир, 1976. — 784 с.
9. Рахимбаев, Ш.М. Процессы кольматации при химической коррозии цементных систем. Физическая модель [Текст] / Ш.М. Рахимбаев // Бетон и железобетон. — 2013. — № 4. — С. 30–32.

СЕЛЯЕВ Владимир Павлович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.; E-mail: ntorm80@mail.ru
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск
СЕДОВА Анна Алексеевна, канд. хим. наук, доц.
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск
КУПРИЯШКИНА Людмила Ивановна, канд. техн. наук, проф.; E-mail: kupriashkina.liudmila@yandex.ru
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск
ОСИПОВ Анатолий Константинович, канд. хим. наук, доц.
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Получено после доработки 02.07.15

Selyaev Vladimir Pavlovich, RAASN academician, doctor of technical sciences, professor; E-mail: ntorm80@mail.ru, Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia
Sedova Anna Alexeevna, candidate of chemical sciences, assistant professor, Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia
Kupriyashkina Lyudmila Ivanovna, candidate of technical sciences, professor; E-mail: kupriashkina.liudmila@yandex.ru, Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia
Osipov Anatoliy Konstantinovich, candidate of chemical sciences, assistant professor, Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

EFFECT OF THE CONCENTRATION OF PHOSPHORIC ACID AND THE DEGREE OF FILLING OF ZEOLITE-CONTAINING ROCKS ON THE STRENGTH OF CEMENT STONE

Studied the influence of phosphoric acid of different concentrations and time of exposure of the cement stone in model solutions on their strength. Was obtained the kinetic dependences of pH during the exposure of the cement stone in aggressive environment. Analyzed damage to materials in contact with aggressive media. Installed the precipitate from the samples. Was determined the strength of cement stone, filled with a zeolite, after exposure in solutions of phosphoric acid.

Key words: strength, zeolite-containing rocks, corrosion resistance, solution, phosphoric acid, concentration, filler, cement stone.

REFERENCES

1. Solomatov, V.I. Chemical resistance of materials. 2-e izd., rev. and advanced [Text] / V.I. Solomatov, V.P. Selyaev, Yu.A. Sokolova. — M. : Academy, 2001. — 284 p.
2. Selyaev, V.P. Evaluation of durability, the residual life of concrete structures exposed to aggressive liquid environments. Concrete and reinforced concrete — glance at future [Text] / V.P. Selyaev, P.V. Selyaev, E.V. Sorokin // Scientific proceedings of the III all-Russian (second International) conference on concrete and reinforced concrete, Moscow, 12–16 may 2014. Vol. 3. Valves and system reinforcement. Fibrobetony and amazement. The longevity issue. — M. : MGSU, 2014. — P. 399–415.
3. Selyaev, V.P. The influence of zeolite fillers on the strength and porosity of cement composites [Text] / V.P. Selyaev, V.A. Neverov, L.I. Kupriyashkina // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 6. — P. 36–44.
4. Sedova, A.A. The study of the processes of damage of cement stone solutions of carboxylic acids [Text] / A.A. Sedova, B.M. Ivanov, V.P. Selyaev, R.A. Polyanskov, A.K. Osipov, L.I. Kupriyashkina // Vestnik Mosk. Univ. Ser. 2. Chemistry. — 2014. — Vol. 55, N 5. — P. 296–301.
5. Selyaev, V.P. The study of the processes of damage of cement paste, filled with a zeolite-containing rock by solutions of hydrochloric acid [Text] / V.P. Selyaev, A.A. Sedova, L.I. Kupriyashkina, A.K. Osipov, E.I. Kupriyashkina // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 7. — P. 32–38.
6. Selyaev, V.P. A comprehensive study of damage processes of cement stone solutions of carboxylic acids [Text] / V.P. Selyaev, A.A. Sedova, L.I. Kupriyashkina, A.K. Osipov // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2013. — N 8. — P. 34–41.
7. Papke, K.G. Erionite and other associated zeolites in Nevada [Text] / K.G. Papke // Nevada Bureau of Mines and Geology. Bull. 79. — Reno : University of Nevada, 1972. — 32 p.
8. Breck, D. Zeolite molecular sieves [Text] / D. Breck; transl. from English. — M. : Mir, 1976. — 784 p.
9. Rakhimbaev, Sh.M. Processes colmatation in chemical corrosion of cement systems. Physical model [Text] / Sh.M. Rakhimbaev // Concrete and reinforced concrete. — 2013. — N 4. — P. 30–32.

УДК 691.54.001

Г.И. БЕРДОВ, С.А. ВИНОГРАДОВ, А.Н. МАШКИН, В.Ф. ХРИТАНКОВ

ДИЭЛЬКОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАСТВОРА ЭЛЕКТРОЛИТА НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Установлено, что по результатам диэлькометрических измерений (определение электрической емкости системы, тангенса угла потерь концентрированных суспензий) может быть определено оптимальное количество добавки электролита, обеспечивающее повышение свойств цементных строительных материалов.

Ключевые слова: портландцемент, электролит, диэлькометрический анализ, диэлектрические потери.

Введение солей в воду затворения часто применяется для регулирования взаимодействия портландцемента с водой, что обеспечивает повышение механической прочности, морозостойкости цементного камня и бетона [1, 2]. При термообработке бетона действие добавок электролита менее эффективно, чем при нормальном твердении, однако и в этом случае считается целесообразным использование в качестве добавок хлоридов алюминия, кальция, а также солей натрия, особенно сульфатов [1].

Важную роль при взаимодействии портландцемента с растворами электролитов играет обмен ионов твердого тела с ионами растворов.

Способность ионов, содержащихся в твердом теле, к обмену с ионами из растворов солей зависит от комплекса факторов:

1) концентрации обменивающихся ионов;
2) зарядов и размеров обменивающихся ионов;
3) энергии связи ионов в твердом теле;
4) стерической доступности ионов твердого тела.

При гетеровалентном изоморфизме важным условием является компенсация заряда кристаллической решетки. Гетеровалентный изоморфизм осуществляется в порядке рядов, соответствующих диагоналям периодической системы Д.И. Менделеева. Компенсация зарядов обеспечивается за счет количества обменивающихся ионов и сопровождается возникновением вакансий в кристаллической решетке или внедрением в нее добавочных катионов. Ионы с большими зарядами легче входят в кристаллическую решетку, чем ионы меньших зарядов взамен многозарядных.

В случае портландцемента эффективно использование электролитов, содержащих многозарядные катионы и анионы. К их числу относятся сульфаты алюминия и железа [2].

При этом четко проявляется оптимальная концентрация электролита. Для $Al_2(SO_4)_3$ она составляет 1 % от массы цемента [2]. Увеличение прочности при сжатии образцов цементного камня, цементно-песчаного раствора и бетона составляет 30–40 % как после твердения в течение 28 сут при нормальных условиях, так и после тепловлажностной обработки.

© Бердов Г.И., Виноградов С.А., Машкин А.Н., Хританков В.Ф., 2015

В данной работе для исследования влияния электролитов на свойства концентрированных цементных суспензий (цементного теста нормальной густоты) использован высокочастотный диэлькометрический анализ [3].

Диэлькометрия (или диэлектрометрия) — метод исследования структуры и свойств веществ путем определения их диэлектрических свойств — диэлектрической проницаемости ε и тангенса угла диэлектрических потерь tgδ. Диэлектрическая проницаемость характеризует поляризацию веществ [4, 5] под действием электрического поля, tgδ — потери в нем энергии поля. При высокочастотном диэлькометрическом анализе используются емкостные измерительные ячейки и измерители добротности. Экспериментально определяют электрическую емкость и добротность измерительного контура. Добротность (*Q*) характеризует потери энергии, она тем больше, чем меньше диэлектрические потери в исследуемом материале [5].

Диэлектрические свойства воды изучены подробно [6]. У цементных материалов диэлектрические свойства, как правило, не относят к числу эксплуатационных. Они мало исследованы для портландцемента как в исходном, так и в гидратированном состоянии.

Определение диэлектрических свойств концентрированных суспензий проведено на измерителе добротности Tesla BM-560. При исследовании твердых веществ, содержащих полярные молекулы воды, информативным является диапазон частот 10^6–10^7 Гц [7]. В данной работе основная часть экспериментов проведена на частоте 1,5 МГц.

Рассматриваемые водные суспензии обладают достаточно большой сквозной электрической проводимостью. Для ее исключения использована специальная емкостная измерительная ячейка. Она представляет собой цилиндр из полиэтилена, закрываемый полиэтиленовой крышкой. К внешней поверхности крышки и дну цилиндра плотно крепятся металлические электроды. Заполняемый исследуемой суспензией объем ячейки имеет внутренний диаметр 90 мм, высоту 50 мм. В опыте фиксировалась емкость (*C*) и добротность (*Q*) контура с пустой ячейкой и заполненной водой или исследуемой суспензией.

Добротность пустой ячейки на частоте 1,5 МГц при температуре 20 °С составляла 130, емкость 132,7 пФ. У ячейки, заполненной водой, добротность была равна 40, емкость 111,7 пФ.

Исследована начальная стадия взаимодействия цемента с водой. Измерения проводились при температуре 20 °С в течение 7 ч. В течение трех первых часов измерения проводились через 10 мин, в последующем — через 30 мин.

Исследован портландцемент производства ОАО «Искитимцемент» (Новосибирская область) марки ПЦ 400 Д-20. Его минералогический состав, мас. %: C_3S — 50–55, C_2S — 18–22, C_3A — 7–11, C_3AF — 12–15. Удельная поверхность составляла 320 м^2/кг. Химический состав цемента, мас. %: SiO_2 — 20,7; Al_2O_3 — 6,9; Fe_2O_3 — 4,6; CaO — 65,4; MgO — 1,3; SO_3 — 0,4; п.п.п. — 0,5.

Суспензия (тесто нормальной густоты) имела соотношение вода/цемент, равное 0,34. Добавка сульфата алюминия составляла 0,5; 1 и 2 % от массы цемента (в расчете на безводную соль). При введении добавки сульфата алюминия диэлектрические потери, как правило, уменьшаются (см. таблицу).

Значение тангенса угла диэлектрических потерь (tgδ×10⁴) цементной суспензии, содержащей добавку сульфата алюминия

Количество вводимой добавки, %	Время от начала затворения, ч								
	0	0,5	1	2	3	4	5	6	7
0	241	288	284	322	354	356	357	322	320
0,5	321	312	321	304	286	256	276	—	—
1,0	112	105	103	99	96	102	96	97	99
2,0	155	146	146	155	149	150	155	144	141

Тангенс угла диэлектрических потерь суспензии, содержащей добавку сульфата алюминия, меньше, чем у суспензии без такой добавки. Конструкция измерительной ячейки исключает сквозную проводимость через суспензию. В этом случае диэлектрические потери определяются в основном полярными молекулами воды. При этом четко прослеживаются на протяжении всего исследованного интервала времени взаимодействия минимальные значения tgδ, соответствующие 1 % добавки $Al_2(SO_4)_3$. Именно такое количество добавки обеспечивает максимальное увеличение механической прочности цементного камня, цементно-песчаного раствора и бетона при ее введении [2].

Это действие добавки может быть обусловлено тем, что достигается наиболее прочное энергетическое взаимодействие полярных молекул воды в системе, в результате чего ограничивается их вклад в диэлектрические потери.

Таким образом, диэлькометрическое исследование цементных суспензий, содержащих добавки электролитов, позволяет оценить эффективность действия добавок и определить оптимальное их количество, обеспечивающее повышение свойств цементных строительных материалов. Это может быть осуществлено без проведения длительных и трудоемких испытаний образцов цементного камня и бетона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горчаков, Г.И. Строительные материалы [Текст] / Г.И. Горчаков, Ю.М. Баженов. — М. : Стройиздат, 1986. — 688 с.
2. Ильина, Л.В. Повышение свойств цементных материалов путем введения добавок электролита [Текст] / Л.В. Ильина, Г.И. Бердов. — Новосибирск : НГАСУ, 2012. — 134 с.
3. Бердов, Г.И. Высокочастотный диэлькометрический анализ процесса гидратации портландцемента [Текст] / Г.И. Бердов, С.А. Виноградов, А.Н. Машкин, Б.В. Крутасов // Сб. науч. трудов междунар. науч. техн. конф. «Стройсиб-2014». — Новосибирск : НГАСУ, ТГАСУ, РАЕН, 2014. — С. 71–74.
4. Заринский, В.А. Диэлькометрия [Текст] / В.А. Заринский // Хим. энцикл. Т. 2. — М. : Сов. энцикл., 1990. — С. 210.
5. Заринский, В.А. Высокочастотный химический анализ [Текст] / В.А. Заринский, В.И. Ермаков. — М. : Наука, 1970. — 200 с.
6. Хиппель, А.Р. Диэлектрики и их применение [Текст] / А.Р. Хиппель; пер. с англ. — М.; Л. : Госэнергоиздат, 1959. — 336 с.
7. Водопьянов, К.А. Температурно-частотная зависимость для диэлектрических потерь в кристаллах с полярными молекулами [Текст] / К.А. Водопьянов // Докл. АН СССР. — 1952. — Т. 94, № 5. — С. 919–921.

БЕРДОВ Геннадий Ильич, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
ВИНОГРАДОВ Семен Алексеевич, асп.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
МАШКИН Алексей Николаевич, канд. техн. наук
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
ХРИТАНКОВ Владимир Федорович, д-р техн. наук
Новосибирский государственный аграрный университет

Получено 14.07.15

Berdov Gennadiy Ilyich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Vinogradov Semen Alexeevich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Mashkin Alexey Nikolaevich, candidate of technical sciences, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Khritankov Vladimir Fedorovich, doctor of technical sciences, Novosibirsk State Agrarian University, Russia

DIELCOMETRIC ANALYSIS OF INFLUENCE ELECTROLYTE SOLUTION ON THE PROPERTIES OF CEMENT MATERIALS

It was found that the results of measurements dielcometric (definition of capacitance, dissipation factor concentrated suspensions) can be determined by the optimum amount of electrolyte additives, ensuring higher properties of cement building materials.

Key words: portland cement, electrolyte, dielcometric analysis, dielectrical losses.

REFERENCES

1. Gorchakov, G.I. Construction materials [Text] / G.I. Gorchakov, Yu.M. Bazhenov. — M. : Stroyizdat, 1986. — 688 p.
2. Ilina, L.V. Enhancing the properties of cementitious materials by introducing the electrolyte additives [Text] / L.V. Ilina, G.I. Berdov. — Novosibirsk : NSUACE, 2012. — 134 p.
3. Berdov, G.I. High dielcometric analysis of the hydration process of Portland cement [Text] / G.I. Berdov, S.A. Vinogradov, A.N. Mashkin, B.V. Krutasov // Collection of scientific papers of international scientific technical Stroysib conference. — Novosibirsk, 2014. — P. 71–74.
4. Zarinskiy, V.A. Dielcometric [Text] / V.A. Zarinskiy // Khimicheskaya entsiklopedia. — M. : Soviet encyclopedia, 1990. — P. 210.
5. Zarinskiy, V.A. High frequency chemical analysis [Text] / V.A. Zarinskiy, V.I. Ermakov. — M. : Nauka, 1970. — 200 p.
6. Hippel, A.R. Dielectrics and their application [Text] / A.R. Hippel; trancl. from English. — M.; L. : Gosenergoizdat, 1959. — 336 p.
7. Vodopyanov, K.A. Temperature-frequency dependence for dielektrical losses in crystals with polar molecules [Text] / K.A. Vodopyanov // Reports of Akademy of Sciences USSR. — 1952. — Vol. 94, N 5. — P. 919–921.

УДК 691.542 : 536.2

И.Н. КУЗНЕЦОВА, А.Ф. КОСАЧ, М.А. РАЩУПКИНА, Н.А. ГУТАРЕВА

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ МИНЕРАЛОВ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ НА ЕГО СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА

Экспериментально установлен и обоснован механизм образования эттрингитовой фазы в цементном камне на портландцементе разных марок, дана закономерность влияния содержания эттрингита в цементном камне на его теплопроводность.

Ключевые слова: цементный камень, эттрингит, теплопроводность.

Интенсивным развитием современной технологии бетонов различного назначения на минеральном вяжущем материалов и изделий является выработка различных научно обоснованных методов регулирования. Они дают возможность целенаправленно изменять процесс твердения и при этом управлять свойствами получаемого твердого тела с применением высокодисперсных материалов в бетонах различного назначения. В этом сложном процессе определяющая роль принадлежит цементному тесту, которое структурируется во времени и поэтому весьма чувствительно к прилагаемым физико-химическим воздействиям [1].

Физико-химические процессы образования продуктов гидратации — это типичные формы нанотехнологических процессов, так как они протекают на атомно-молекулярном уровне. Технология «сверху вниз» основана на уменьшении размеров физических тел или структурных объектов механическим или другим способом до микроскопических размеров. Технология «снизу вверх» или механосинтез заключается в сборке создаваемой конструкции непосредственно из продуктов гидратации, состоящих из элементарных структурных элементов-атомов, молекул, структурных фрагментов биологических клеток и т.п.

В статье обосновано образование минералов гидросульфоалюмината кальция (эттрингита) и портландита при формировании цементного камня. Установлены значения теплопроводности цементного камня на различных портландцементах.

Цементный камень — основной компонент бетона, определяющий его свойства и долговечность, содержащий участки с различной структурой, сложенные разными минералами. Свойства цементного камня зависят от его минерального состава. Изменяя минеральный состав вяжущего и условия твердения, можно получать различные типы микроструктуры цементного камня. Структура бетона, как правило, изотропна, т.е. ее свойства по разным направлениям приблизительно одинаковы. Взаимодействие портландцемента с водой приводит к образованию новых веществ и пор, которые зависят от химического состава и водоцементного отношения.

Весь процесс структурообразования цементного камня в бетоне можно условно разделить на два основных периода. В каждом периоде, в свою

© Кузнецова И.Н., Косач А.Ф., Ращупкина М.А., Гутарева Н.А., 2015

очередь, можно выделить две стадии: первый период — подготовительная стадия и стадия образования структурированной системы (коагуляционной структуры); второй период — стадия образования кристаллического каркаса и его развития (прорастания) и стадия длительного нарастания прочности структуры. При твердении бетона происходит дисперсное взаимодействие коллоидных частиц, от которого зависит в том числе плотность структуры и характеристика бетонов после завершения гидратации вяжущих [1].

Естественно, четких границ между периодами и стадиями не существует, их можно установить только по признакам, свидетельствующим о том, что одни процессы в данный момент превалируют над другими. Тем не менее для управления структурообразованием необходимо иметь информацию о кинетике его развития в данных условиях, чтобы решения о технологических управляющих воздействиях были научно обоснованны и оптимальны.

Каждая стадия структурообразования характеризуется определенными свойствами возникающих (или преобладающих) в это время структур: интенсивностью выделения теплоты, пластической прочностью, электропроводностью, степенью гидратации и др. Исследуя косвенными методами кинетику изменения этих свойств во времени путем построения графических зависимостей, можно на полученных кривых выделить определенные участки, характерные для различных стадий структурообразования [2].

В процессе формирования структуры цементного камня образуется гидросульфоалюминат кальция $3CaO \cdot Al_2O_3 \times 3CaSO_4 \times 32H_2O$ — минерал эттрингит, который определяет основные свойства цементного камня: прочность и теплопроводность. Сам цементный камень после завершения гидратационного твердения состоит из четырех основных компонентов [1]: портландит [гидроксид кальция $Ca(OH)_2$]; фаза гидросиликатов кальция (CSH); гидроалюмоферритная фаза; гидросульфоалюминатная фаза, состоящая из эттрингита (с частичным превращением на поздних стадиях твердения в сульфоалюминат) [2].

Эттрингитовая фаза представляет собой мельчайшие частицы, не имеющие условий для роста, которые сохраняются длительное время. Эттрингитовая фаза перекристаллизуется при снижении в поровой жидкости бетона концентрации ионов Ca^{2+}, OH^-, SO_4^{2-}. Область устойчивости эттрингита соответствует значениям pH от 10,45 до 13,0, а pH поровой жидкости колеблется от 13,2 до 13,9. Процентное соотношение зависит от воздействующих внешних условий на цементный камень [3]. С.М. Базанов установил в исследованиях [4], что более высокая температура (от $+20 \pm 2$ °C) приводит к образованию эттрингита [5].

Пластическая прочность цементного теста на ранних стадиях схватывания определяется пространственной сеткой гидросульфоалюмината кальция (эттрингита $3CaO \cdot Al_2O_3 \times 3CaSO_4 \times 32H_2O$). Далее прочность твердеющего цементного теста зависит от формирования гидросиликатных новообразований волокнистого и пластинчатого строения. Кристаллы эттрингита обусловливают раннюю прочность затвердевшего цемента. Эттрингит, содержащий 31–32 молекулы кристаллизационной воды, занимает примерно вдвое больший объем по сравнению с суммой объемов

реагирующих веществ (C_3A и сульфат кальция). Заполняя поры цементного камня, эттрингит повышает его механическую прочность и стойкость.

Образование минералов эттрингита и портландита: в начальной стадии гидратации цемента быстрое взаимодействие алита с водой приводит к образованию гидросиликата и гидроксида кальция, далее образуются свободная щелочь и слабо закристаллизованные гидросиликаты кальция C–S–H(I) и C–S–H(II). Гидроксид кальция (минерал портландит) образуется из алита после затворения. Белит гидратируется медленнее алита, при его взаимодействии с водой выделяется меньше $Ca(OH)_2$, образуется смесь слабо закристаллизованных гидросиликатов кальция (гель C–S–H) со средними молярными отношениями CaO/SiO_2 = 1,5...1,8 и CaO/H_2O = 1...1,5. Выделяющийся гидроксид кальция быстро насыщает воду, предотвращая гидролиз остальных компонентов клинкера [2, 6]. Взаимодействие трехкальциевого алюмината с водой приводит к образованию гидроалюмината кальция (гидрогранат). Природный гипс (3–5 % от массы цемента при помоле клинкера) замедляет схватывание. Сульфат кальция реагирует с трехкальциевым алюминатом и связывает его в гидросульфоалюминат кальция (минерал эттрингит) в начале гидратации портландцемента:

$$3CaO \cdot A1_2O_3 + 3(CaSO_4 \cdot 2H_3O) + 26H_2O = 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O.$$

Эттрингит в цементном камне может играть как конструктивную, так и деструктивную роль. При гидратации цемента образование и рост кристаллов эттрингита возможны лишь на самой ранней стадии. Эттрингит не является причиной разрушения цементного камня, когда он образуется в свежеприготовленной цементной смеси, его называют эттрингит первичный (Early Ettringite Formation — EEF) согласно международной классификации [4].

Эттрингит, который образуется в течение нескольких месяцев и лет, называют эттрингит вторичный (Delayed Ettringite Formation — DEF) согласно международной классификации [7]. Эттрингит взаимодействует с $Ca(OH)_2$, выделяющимся при гидратации алита C_3S. При достаточном содержании $CaSO_4$ образуется большее количество эттрингита [5].

На гидратацию C_3A, C_4AF и C_2S в цементе влияет изменение количества Ca^{2+} или OH^- в гидратном растворе. Алит C_3S является основным поставщиком портландита $Ca(OH)_2$ в жидкую фазу. В цементном камне на портландцементе образуется кристаллический или аморфный портландит $Ca(OH)_2$. В гидратированном портландцементом камне портландит $Ca(OH)_2$ составляет около 20–25 % твердого вещества. Плотность портландита $Ca(OH)_2$ равна 2240 кг/м^3. На рентгенограммах кристаллический портландит дает четкие пики. Кристаллы портландита $Ca(OH)_2$ плоские или призматические, легко раскалываются и могут плотно срастаться с гидросиликатами кальция C–S–H.

Рентгенограмма цементного камня вида № 1 по пикам с d, $\cdot 10^{-10}$ м = 3,1; 2,59; 1,926; 1,79; 1,68; 1,48; 1,45; 1,41; 1,05 и 9,76; 2,1; [$Ca(OH)_2$ и $Ca_2SiO_4 \times H_2O$] и d, $\cdot 10^{-10}$ м = 3,89; 3,04; [$CaCO_3$] подтверждает наличие продуктов гидратации и твердения. Содержание Ca_2SiO_4 устанавливается по линиям d, $\cdot 10^{-10}$ м = 4,94; 2,78; 2,4; 2,18; 2,06; 1,97; 1,92.

На рентгенограмме цементного камня вида № 2п наличие α-кварца (SiO_2) подтверждается по пикам с *d*, $\cdot 10^{-10}$ м = 4,27; 3,35; 2,45; 2,28; 2,13; 1,81; 1,66; 1,62; 1,54; 1,37; 1,28; 1,25; 1,22; 1,99; 1,18; 1,15. Наличие продуктов гидратации и твердения установлено по пикам с *d*, $\cdot 10^{-10}$ м = 4,92; 2,63; 2,45; 1,48; 1,45; 9,8; [$Ca(OH)_2$ и $Ca_2SiO_4 \times H_2O$] и *d* = 3,87; 3,04; 2,05; 1,92 [$CaCO_3$]. Содержание Ca_2SiO_4 устанавливается по линиям *d*, $\cdot 10^{-10}$ м = 2,77; 2,18; 1,97.

На рентгенограмме цементного камня вида № 2 наличие продуктов гидратации и твердения установлено по пикам с *d*, $\cdot 10^{-10}$ м = 4,95; 3,1; 1,92; 1,68; 2,62; 1,76; 1,44; 1,31; 1,36; 1,046; 9,79; 3,19; 1,82; [$Ca(OH)_2$ и $Ca_2SiO_4 \times H_2O$] и *d*, $\cdot 10^{-10}$ м = 3,88; 2,45; 2,28 [$CaCO_3$]. Содержание Ca_2SiO_4 устанавливается по линиям *d*, $\cdot 10^{-10}$ м = 2,75; 2,62; 2,45; 2,05; 1,62. В составе данного образца фиксируется наличие $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$ по пикам с *d*, $\cdot 10^{-10}$ м = 2,96; 2,86.

На рентгенограмме цементного камня вида № 3 по пикам с *d*, $\cdot 10^{-10}$ м = = 4,94; 3,11; 2,62; 1,79; 1,92; 1,68; 1,53; 1,48; 1,45; 1,31; 1,17; 1,14; 9,79; 3,11; 1,82; [$Ca(OH)_2$ и $Ca_2SiO_4 \times H_2O$] и *d*, $\cdot 10^{-10}$ м = 3,88; 3,04; 2,49; 2,37; 2,01 [$CaCO_3$] установлено наличие продуктов гидратации и твердения. Содержание Ca_2SiO_4 устанавливается по линиям *d*, $\cdot 10^{-10}$ м = 2,88; 2,69; 2,77; 2,44; 2,06; 1,9; 1,62; 1,57. В составе данного образца фиксируется наличие $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$ по пикам с *d*, $\cdot 10^{-10}$ м = 2,96; 2,62.

Рентгенограмма цементного камня вида № 3п характеризуется пиками с *d*, $\cdot 10^{-10}$ м = 4,26; 3,31; 2,28; 2,12; 1,98; 1,81; 1,67; 1,54; 1,37; 1,28; 1,19; 1,17, подтверждается наличие α-кварца (SiO_2). По пикам с *d*, $\cdot 10^{-10}$ м = 4,93; 2,62; 1,92; 1,67; 1,45; 9,67; 3,04 [$Ca(OH)_2$ и $Ca_2SiO_4 \times H_2O$] и *d*, $\cdot 10^{-10}$ м = 3,86; 3,04; 1,92 [$CaCO_3$] установлено наличие продуктов гидратации и твердения. Содержание Ca_2SiO_4 устанавливается по линиям *d*, $\cdot 10^{-10}$ м = 2,77; 2,61; 2,18; 1,98. В составе данного образца фиксируется наличие $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$ по пикам с *d*, $\cdot 10^{-10}$ м = 2,98; 2,64.

Теплопроводность материала характеризует процесс кондуктивного теплопереноса путем непосредственного соприкосновения между частицами с различной температурой, т.е. переноса тепла посредством колебательного движения частиц материала. Теплопроводность цементного камня является суммарной характеристикой кондуктивной теплопроводности непрореагировавших зерен и новообразований цемента, а также микропор (8…10 % от общей пористости).

Оценим закономерность влияния содержания эттрингита в цементном камне на портландцементе разных марок на его теплопроводность. Для исследования содержания эттрингита и коэффициента теплопроводности методом стационарного теплового потока на приборе ИТП-МГ4 согласно ГОСТ 7076–99 исследованы образцы цементного камня размерами 100×100×15 мм на портландцементе Искитимского завода из цементного теста нормальной густоты, процентное содержание основных минералов и оксидов для каждого вида цемента представлено в табл. 1.

Минеральный состав образцов по результатам рентгенофазового анализа, проведенного на рентгеновском дифрактометре «Bruker D8 ADVANCE», представлен в табл. 2.

Рентгенофазовый анализ показал, что образцы содержат минералы: карбонат кальция $CaCO_3$, гидроксид кальция $Ca(OH)_2$, гидросиликат кальция Ca_2SiO_4, алюмосиликат кальция $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$, а также образцы цементного

Таблица 1. **Вещественный состав портландцемента**

Образцы (марка цемента)	Вещественный состав цемента — содержание по массе, %	Значения по ГОСТ 31108–2003	Фактический показатель в цементе (значения завода)	Результаты испытаний цемента
№ 1 ЦЕМ I 52,5Н	Портландцементный клинкер	95–100	100	100
	Гипсовый камень–ангидрида серной кислоты (VI) SO_3	Не более 4,0	1,5–3,5	2,7
	Массовая доля оксида магния MgO в клинкере	Не более 5,0	—	2,2
	Хлор-ион Cl^- в клинкере	Не более 0,1	—	0,03
	Трехкальциевый алюминат C_3A	Не более 8,0	Не более 8,0	6,0
№ 2 ЦЕМ II /А-Ш 42,5Н	Портландцементный клинкер	80–94	88–82	81
	Доменный гранулированный шлак	6–20	12–18	17
	Гипсовый камень–ангидрида серной кислоты (VI) SO_3	Не более 3,5	2,0–3,0	2,07
	Массовая доля оксида магния MgO в клинкере	Не более 5,0	Не более 1,8	1,7
	Массовая доля свободного оксида кальция CaO св.в клинкере	Не нормир.	Не более 0,5	0,2
	Хлор-ион Cl^- в клинкере	Не более 0,1	—	0,039
№ 3 ЦЕМ I 52,5Н	Портландцементный клинкер	95–100	100	100
	Гипсовый камень–ангидрида серной кислоты (VI) SO_3	Не более 4,0	2,3–3,0	2,7
	Массовая доля оксида магния MgO в клинкере	Не более 5,0	Не более 1,8	1,7
	Массовая доля свободного оксида кальция CaO св.в клинкере	Не нормир.	Не более 0,5	0,2
	Хлор-ион Cl^- в клинкере	Не более 0,1	—	0,03

Таблица 2. **Минеральный состав образцов цементного камня**

Образцы	Минералы					
№ 1 ЦЕМ I 52,5Н	—	$CaCO_3$	$Ca(OH)_2$	Ca_2SiO_4	$Ca_2SiO_4 \cdot H_2O$	—
№ 2п ЦЕМ II /А-Ш 42,5Н	α-кварц (SiO_2)	$CaCO_3$	$Ca(OH)_2$	Ca_2SiO_4	$Ca_2SiO_4 \cdot H_2O$	—
№ 2 ЦЕМ II /А-Ш 42,5Н	—	$CaCO_3$	$Ca(OH)_2$	Ca_2SiO_4	$Ca_2SiO_4 \cdot H_2O$	$Ca_3Al_2Si_3O_{12}$
№ 3 ЦЕМ I 52,5Н	—	$CaCO_3$	$Ca(OH)_2$	Ca_2SiO_4	$Ca_2SiO_4 \cdot H_2O$	$Ca_3Al_2Si_3O_{12}$
№ 3п ЦЕМ I 52,5Н	α-кварц (SiO_2)	$CaCO_3$	$Ca(OH)_2$	Ca_2SiO_4	$Ca_2SiO_4 \cdot H_2O$	—

Примечание. Здесь и в табл. 3: 2п — цифра — номер образцов на определенной марке цемента, буква «п» — образец с песком.

камня на вольском песке содержат α-кварц SiO_2. Линии интенсивности кристаллических фаз исследуемых образцов практически совпадают, но имеют незначительную разницу в интенсивности, следовательно, образцы различаются по процентному содержанию минералов. Сравнение интенсивности линий фаз показывает преобладание в образцах кальция карбоната $CaCO_3$ и других минералов. Экспериментально установлена теплопроводность цементного камня на разных портландцементах и представлена в табл. 3.

Таблица 3. **Физико-технические свойства цементного камня**

Образцы цементного камня (марка применяемого цемента в образцах)	Плотность ρ, кг/м^3	Масса *m*, г	Объем *V*, см^3	Размеры, мм			Теплопроводность $\lambda^{и}_{ц.к}$, Вт/(м·К)
				δ	*a*	*b*	
1 ЦЕМ I 52,5Н	2153	340,5	157,3	15,5	100,3	101,2	0,417
2 ЦЕМ II /А-Ш 42,5Н	2102	332,2	158,7	15,6	100,3	101,4	0,410
2п ЦЕМ II /А-Ш 42,5Н	2111	345,9	165,1	16,4	100,5	100,2	0,582
3 ЦЕМ I 52,5Н	2070	349,7	158,3	15,7	100,6	100,2	0,407
3п ЦЕМ I 52,5Н	2188	346,2	164,6	16,3	100,9	100,1	0,465

В цементном камне теплопроводность вызвана упругими тепловыми колебаниями групп атомов в структурной решетке материала, чем больше атомная масса химических компонентов, входящих в его состав, тем меньше теплопроводность материала, так как тяжелые атомы или атомные группы, образующие кристаллы материала, слабее между собой связаны [8, 9]. Установлено, что, применяя портландцемент в цементном камне с большим содержанием кальция, марганца, железа на 3–5 %, атомная масса которых значительно больше по сравнению с атомной массой углерода и серы, получаем теплопроводность меньше, чем у цементного камня на портландцементе марки ЦЕМ I 52,5Н на 10–15 % при одинаковой средней плотности 2137 кг/м^3. Анализируя теплопроводность цементного камня на силикатных песках, в которых содержание кальция больше, можно сделать вывод, что она будет выше, чем на вольском песке. То есть, чем больше атомная масса химических компонентов, входящих в его состав, тем меньше теплопроводность материала.

Анализ полученных коэффициентов теплопроводности [10] показал, что увеличение содержания алита C_3S приводит к увеличению коэффициента теплопроводности, с уменьшением содержания C_3S и увеличением содержания C_2S, алюмината C_3A, алюмоферрита C_4AF теплопроводность уменьшается. Наиболее значимое влияние на теплопроводность оказывает алюминат кальция C_3A. Теплопроводность цементного камня с оптимальным содержанием эттрингита ($3CaO \cdot Al_2O_3 \times 3CaSO_4 \times 32H_2O$) составляет 0,407 Вт/(м·К).

Достоверность полученных результатов подтверждается согласованием их с экспериментальными и расчетными данными других авторов. В дальнейшем необходимо определить допустимое содержание компонентов (добавок, цемента, воды и т.д.) цементного камня, при котором образуется первичный эттрингит в большем количестве, а добавки (минеральные и электролиты) снизят вероятность образования вторичного эттрингита при атмосферном воздействии, что приведет к повышению прочности цементного камня и уменьшению его теплопроводности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гусев, Б.В. Прочность полидисперсного композиционного материала, типа цементного бетона и особенности напряженно-деформированного состояния такого материала при действии сжимающих нагрузок [Текст] / Б.В. Гусев. — М. : ЦИСН, 2003. — 37 с.
2. Шмитько, Е.И. Химия цемента и вяжущих веществ [Текст] / Е.И. Шмитько, А.В. Крылова, В.В. Шаталова. — Санкт-Петербург, 2006. — 206 с.
3. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий [Текст] / К.Ф. Фокин; под ред. Ю.А. Табунщикова, В.Г. Гагарина // АВОК-ПРЕСС. — 5-е изд., пересм. — М., 2006. — 256 с.
4. Базанов, С.М. Механизм разрушения бетона при воздействии сульфатов [Текст] / С.М. Базанов // Строительные материалы. — 2004. — № 9. — С. 46–48.
5. Collepardi, M. Damage by Delayed Ettringite Formation [Текст] / M. Collepardi // A Holistic Approach and New Hypothesis. Concrete International. — 1999. — Vol. 21, N 1. — P. 69–74.
6. Clark, L. Thaumasite form of sulfate attack [Текст] / L. Clark // Concrete International. — 1999. — Vol. 22, N 2. — P. 37–40.
7. Косач, А.Ф. Влияние минералогического состава цемента на теплопроводность цементного камня [Текст] / А.Ф. Косач, И.Н. Кузнецова, М.А. Ращупкина // Изв. вузов. Строительство. — 2009. — № 8. — С. 26–31.
8. Косач, А.Ф. Технология и производство ячеистых бетонов на основе отходов кварца [Текст] / А.Ф. Косач, И.Н. Кузнецова, С.В. Данилов, Н.А. Гутарева // Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». — Омск, 2013. — № 3 (31). — С. 82–87.
9. Кузнецова, И.Н. Технология пенобетона на основе торфа [Текст] / И.Н. Кузнецова, М.А. Ращупкина, С.В. Жуков // Научный рецензируемый журнал «Вестник СибАДИ». — Омск, 2014. — № 4 (38) . — С. 72–77.
10. Штарк, Й. Является ли эттрингит причиной разрушения бетона [Текст] / Й. Штарк, К. Больманн, К. Зайфарт // Цемент и его применение. — 1998. — № 2. — С. 13–22.

КУЗНЕЦОВА Ирина Николаевна, канд. техн. наук, доц.
Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск
КОСАЧ Анатолий Федорович, д-р техн. наук, проф.
Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск
РАЩУПКИНА Марина Алексеевна, канд. техн. наук, доц.
Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, г. Омск
ГУТАРЕВА Наталья Анатольевна, асп.
Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

Получено после доработки 08.07.15

Kuznetsova Irina Nikolaevna, candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian State Automobile and Highway Academy, Omsk, Russia
Kosach Anatoliy Fedorovich, doctor of technical sciences, professor, Ugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia
Rashchupkina Marina Alexeevna, candidate of technical sciences, assistant professor, Siberian State Automobile and Highway Academy, Omsk, Russia
Gutareva Natal'ya Anatol'evna, post-graduate student, Ugra State University, Khanty-Mansiysk, Russia

INFLUENCE OF THE MAIN MINERALS OF THE CEMENT STONE ON ITS STRUCTURE AND PROPERTIES

The mechanism of formation of an ettringitovy phase in a cement stone on a portlandtsement of different brands is experimentally established and reasonable, regularity of influence of the maintenance of an ettringite in a cement stone on its heat conductivity is given.

Key words: the cement stone, ettringite, thermal conductivity.

REFERENCES

1. Gusev, B.V. Prochnost of polydisperse composite material, like cement concrete and feature of the intense deformed condition of such material at action of the squeezing loadings [Text] / B.V. Gusev. — M. : TsISN, 2003. — 37 p.
2. Shmitko, E.I. Himiya of cement and the knitting substances [Text] / E.I. Shmitko, A.V. Krylova, V.V. Shatalova. — St. Petersburg, 2006. — 206 p.
3. Fokin, K.F. Stroitelnaya of the heating engineer of the protecting parts of buildings [Text] / K.F. Fokin; under the editorship of Yu.A. Tabunshchikov, V.G. Gagarin//AVOK-PRESS. — 5th prod. — M., 2006. — 256 p.
4. Bazanov, S.M. The mechanism of destruction of concrete at influence of sulfates [Text] / S.M. Bazanov//Construction materials. — 2004. — N 9. — P. 46–48.
5. Collepardi, M. Damage by Delayed Ettringite Formation [Text] / M. Collepardi // A Holistic Approach and New Hypothesis. Concrete International. — 1999. — Vol. 21, N 1. — P. 69–74.
6. Clark, L. Thaumasite form of sulfate attack [Text] / L. Clark // Concrete International. — 1999. — Vol. 22, N 2. — P. 37–40.
7. Kosach, A.F. Influence of mineralogical composition of cement on heat conductivity of a cement stone of [Text] / A.F. Kosach, I.N. Kuznetsova, M.A. Rashchupkina // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2009. — N 8. — P. 26–31.
8. Kosach, A.F. Tekhnologiya and production of cellular concrete on the basis of waste of quartz [Text] / A.F. Kosach, I.N. Kuznetsova, S.V. Danilov, N.A. Gutareva// Scientific reviewed Bulletin of SIBADI. — Omsk, 2013. — N 3 (31). — P. 82–87.
9. Kuznetsova, I.N. Tekhnologiya of foam concrete on the basis of peat [Text] / I.N. Kuznetsova, M.A. Rashchupkina, S.V. Zhukov // Scientific reviewed Bulletin of SIBADI. — Omsk, 2014. — N 4 (38). — P. 72–77.
10. Shtark, Y. Yavlyaetsya ettringit a cause of destruction of concrete [Text] / Y. Shtark, K. Bolmann, K. Zayfart // Cement and its application. — 1998. — N 2. — P. 13–22.

УДК 691.434.7:666.76

В.З. АБДРАХИМОВ, И.Ю. РОЩУПКИНА, Е.С. АБДРАХИМОВА,
А.К. КАЙРАКБАЕВ, А.В. КОЛПАКОВ

ЖАРОСТОЙКИЙ КОМПОЗИТ НА ОСНОВЕ ФОСФАТНЫХ СВЯЗУЮЩИХ И ВЫСОКОГЛИНОЗЕМИСТЫХ ОТХОДОВ

Исследовано влияние высокоглиноземистого нанотехногенного сырья в виде шлама щелочного травления и отработанного катализатора ИМ-2201 на формирование структуры и свойства жаростойких связующих. Проанализированы разработки и представлены результаты исследований по созданию новых бесцементных жаростойких композитов на основе фосфатных связующих для футеровки тепловых агрегатов. Шламовые отходы отличаются от высокодисперсных порошкообразных материалов природного и техногенного происхождения наноразмерностью, которая находится в пределах от 50 до 100 нм и зависит от условий образования.

Ключевые слова: жаростойкий композит, высокоглиноземистые отходы, шлам щелочного травления, фосфатные связующие, тепловые агрегаты, футеровка.

Бурное развитие промышленно-технологической цивилизации неизбежно приведет к истощению природных сырьевых материалов и накоплению большого количества твердых отходов.

Ежегодно в различных отраслях промышленности накапливается огромное количество отходов. На их удаление и хранение затрачивается 8–10 % стоимости производимой продукции, поэтому утилизация таких отходов имеет первостепенное значение [1]. Запасы отходов становятся реальным резервом вторичного сырья, которое может применяться вместо традиционного природного.

Еще в 1992 г. в городе Рио-де-Жанейро была принята концепция устойчивого развития цивилизации, которую приняли 178 стран мира. Данная концепция призывает к необходимости максимального использования промышленных отходов и созданию малоотходных технологий.

Неограниченными возможностями наиболее полного использования отходов обладает отрасль, производящая строительные материалы [2, 3]. Это объясняется крупными масштабами строительного комплекса, его материалоемкостью и номенклатурой изделий. Большинство отходов производств по своему составу и свойствам близко к природному сырью, применяемому для производства строительных материалов [2]. Большая часть отходов производств может использоваться в качестве основного сырья или корректирующих компонентов при изготовлении материалов общестроительного и специального назначения.

Весьма эффективно программа по использованию отходов производств реализовалась в Советском Союзе в 1950–1980 гг. на основе долгосрочных национальных программ. В настоящее время лидерство в применении промышленных отходов перешло к странам Западной Европы, в которых действует стандарт EN 197-1 с 2000 г.

© Абдрахимов В.З., Рощупкина И.Ю., Абдрахимова Е.С., Кайракбаев А.К., Колпаков А.В., 2015

Минеральную сырьевую базу стройиндустрии в настоящее время необходимо разбить на два блока сырья:

а) традиционного природного, которое на грани истощения;

б) техногенного (отходы производств).

По каждому блоку, конечно же, имеются свои проблемы, которые нужно решать и которые, в конечном счете, скажутся на качестве строительного материала и на их стоимости.

Одна из важных экологических проблем — создание безотходных технологий производства материалов, обладающих высокими физико-термическими свойствами, для конструкций футеровок тепловых агрегатов [1–3]. Как известно, практически на каждом предприятии эксплуатируется большое количество тепловых агрегатов и котельных установок. Футеровки промышленных печей, как правило, работают в сложных физико-химических условиях (высокая температура, агрессивная газовая среда, прямой контакт материала футеровки с расплавленным металлом и сплавом, расплавами флюсов). В наших работах [1–4] представлены принципы получения безобжиговых огнеупорных композитов с повышенными сроками службы в качестве футеровочного материала[1]. Применительно к жаростойким бетонам, относящимся к безобжиговым многокомпонентным композитам, использование данных принципов открывает широкие возможности по созданию новых футеровочных материалов с заданными свойствами.

Как показали исследования, наибольшая долговечность футеровок, изготовленных из жаростойких бетонов, может быть достигнута за счет применения в массах химических связующих.

К химическим связующим, применяемым в жаростойких бетонах, относятся жидкое стекло, силикат-глыба (прозрачный стекловидный сплав щелочных силикатов — полуфабрикат жидкого стекла) и фосфатная связка [5, 6].

Из всего набора минеральных вяжущих веществ (портландские и глиноземистые цементы, жидкое стекло и силикат-глыба) наибольшей химической активностью к оксидам и гидроксидам, из которых состоит большинство промышленных отходов, обладают фосфатные связующие[1].

По химическому составу любого техногенного неорганического продукта можно определить его коэффициент активности и спрогнозировать процесс фосфатного связывания, т.е. оценить условия применения тех или иных сырьевых компонентов для синтезирования жаростойких композиций.

За последние годы все большее применение находят фосфатные связующие на основе фосфорных кислот, преимущественно ортофосфорной (H_3PO_4). Их получают при затворении фосфорной кислотой порошков оксидов металлов: алюминия, хрома, титана, меди, магния, железа.

Установлено, что основным фактором, определяющим возможность применения оксидов и гидроксидов для производства фосфатных связующих, является тепловой эффект реакций [2]:

$$Me_nO_m + H_3PO_4 \text{ и } Me(OH)_n + H_3PO_4.$$

[1] Хлыстов А.И., Абдрахимов В.З., Ковков И.В., Абдрахимова Е.С., Денисов Д.Ю. Экологические аспекты использования пиритных огарков в производстве безобжиговых огнеупорных композитов // Башкирский химический журнал. 2009. Т. 16, № 2. С. 81–83.

Фосфатные связующие, имеющие высокую прочность после твердения, способны увеличить прочность при нагревании. Они обладают высокой термостойкостью и многие из них характеризуются высокой огнеупорностью (алюмофосфатные — 1750 °С, хромофосфатные — 2100 °С).

Химические анализы показали, что на предприятиях Самарской области образуются ежегодно сотни тысяч тонн высокоглиноземистых отходов, в которых содержание Al_2O_3 превышает 40–50 %.

В районах Самарской области, где развито нефтехимическое производство (г. Новокуйбышевск — нефтехимкомбинат и г. Тольятти — завод синтетического каучука), имеется довольно значительное количество высокоглиноземистых отходов, например, в процессе синтезирования бутадиен-стирольных каучуков образуется отработанный катализатор ИМ-2201[2], представляющий собой тонкодисперсный в естественном состоянии порошок с удельной поверхностью до 8000 см^2/г и огнеупорностью 2000 °С. Высокая огнеупорность обусловлена повышенным содержанием в отходах оксида алюминия (Al_2O_3 — 74–75 %) и оксида хрома (Cr_2O_3 — 14–15 %).

В работе [1] было показано, что глиноземсодержащий шлам щелочного травления целесообразно использовать в производстве жаростойких композитов на основе фосфатных связующих. В качестве фосфатных связующих использовалась ортофосфорная кислота H_3PO_4 в чистом виде [5, 6], но можно использовать однозамещенный фосфорно-кислый алюминий $Al(H_2PO_4)_3$, двухзамещенный фосфорно-кислый алюминий $Al_2(H_2PO_4)_3$, хромалюминий фосфорно-кислый или алюмохромофосфатное связующее (АХФС) с общей формулой $Cr_nAl_{4-n}(H_2PO_4)_2$, где n = 1, 2, 3 [1–4].

Шлам щелочного травления алюминия является отходом Самарского металлургического завода[2–6]. На данном предприятии техногенные отходы в основном представлены:

1) шламом щелочного травления алюминия и его сплавов (алюмощелочной);

2) шламом систем водоочистки (карбонатный);

3) алюмокальциевым шламом, представляющим собой смесь первых двух.

Вышеприведенные виды техногенных отходов производств целесообразно применять в качестве сырьевых компонентов для получения жаростойких композитов на основе фосфатных связующих взамен дорогостоящих компонентов, таких как $Al(OH)_3$, $CaCO_3$, $MgCO_3$, так как исследуемые шламы по химическому составу представлены карбонатом кальция $CaCO_3$ и гидроксидом $Al(OH)_3$. Химические составы шламов представлены в табл. 1.

---

[2] Абдрахимов В.З. Применение алюмосодержащих отходов в производстве керамических материалов различного назначения // Новые огнеупоры. 2013. № 1. С. 13–23.

[3] Пат. РФ 2387614. С1 С04В 33/132. Керамическая масса для получения кислотоупоров / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов; заявл. 11.01.2009; опубл. 27.04.2010, Бюл. № 12.

[4] Пат. РФ 2385304 С1 С04В 33/132. Керамическая масса для получения кислотоупоров / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов; заявл. 09.12.2008; опубл. 27.03.2010, Бюл. № 9.

[5] Пат. РФ 2443654 С1 С04В 33/132. Керамическая масса для изготовления клинкерных изделий / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов; заявл. 23.06.2010; опубл. 27.02.2012, Бюл. № 6.

[6] Пат. РФ 2412130 С1 С04В 33/132. Керамическая масса для изготовления керамического кирпича / В.З. Абдрахимов, И.В. Ковков, Е.С. Абдрахимова; заявл. 15.10.2009; опубл. 20.02.2011, Бюл. № 5.

Таблица 1. **Оксидный химический состав компонентов**

Компонент	Содержание оксидов, мас. %							
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O	CaO	MgO	SO_3	R_2O	П.п.п.
1. Алюмощелочной	1,7	46,8	1,4	1,2	2,8	0,8	9,8	35,5
2. Карбонатный	4,1	8,2	0,7	38,6	8,3	–	1,2	38,9
3. Алюмокальциевый	8,16	14,84	0,8	26,3	8,26	1,58	1,36	38,7
4. Шлам щелочного травления в обожженном при 1000 °С	2,4	88,4	2,3	1,8	1,3	–	3,4	–

Травление алюминия и алюминиевых сплавов. Алюминий и его сплавы чаще всего травят в растворе, содержащем 50–150 г/л едкого натрия, нагретом до 50–70 °С. Продолжительность травления в зависимости от состояния поверхности и концентрации едкого натрия составляет 0,5–1,5 мин.

Травление алюминия и его сплавов связано с уменьшением начальных размеров деталей, что особенно следует учитывать при обработке плакированных деталей и деталей, имеющих жесткие допуски. В последнем случае травление производят в растворах с меньшей концентрацией едкого натрия[2–6].

В результате травления алюминия в едком натрии образуется алюминат натрия и выделяется водород. Алюминий растворяется в едком натре с выделением водорода и формированием составного алюмината, который существует только в щелочном растворе. Происходящая в этом случае реакция может быть записана двумя способами:

$$1)\ 2Al + 2NaOH + 2H_2O \rightarrow 2NaAlO_2 + 3H_2;$$

$$2)\ 2Al + 2OH^- + 6H_2O \rightarrow 2(Al(OH)_4)^- + 3H_2.$$

Интенсивное выделение водорода свидетельствует о быстром растворении алюминия и может служить сигналом для выгрузки этих деталей из раствора.

После регенерации щелочей из отработанных травильных растворов осаждается осадок — глиноземсодержащий шлам, концентрирующийся на дне ванны и постепенно кристаллизующийся. Шламы этой группы отличаются высоким содержанием Al_2O_3, что способствует при его использовании в составах керамических масс значительному повышению термостойкости кирпича. Повышенное содержание в шламе щелочей (R_2O = 9,8 %, см. табл. 1) позволит снизить температуру обжига кирпича и тем самым повысить прочность изделия, а высокое содержание п.п.п. снизить его вес. Отличительной особенностью шламов от обработки алюминия и его сплавов от других отощителей является высокая степень дисперсности. Положительное следствие высокой дисперсности шлама (9000–10000 см^2/г) — его большая пластичность (число пластичности 8–12).

Нами запатентован способ обогащения шлама щелочного травления оксидом алюминия. Способ[7] основан на предварительном обжиге при температуре 950–1000 °С. Оксидный химический состав обожженного алюмосодержащего шлама представлен в табл. 1, а поэлементный в табл. 2.

[7] Пат. РФ 2394790 C1 C04B 33/138. Способ получения кислотоупорных плиток / В.З. Абдрахимов; заявл. 01.04.2009; опубл. 20.07.2010, Бюл. № 5.

Таблица 2. **Поэлементный химический состав обожженного шлама**

Концентрация, мас. %									
O	Al + Ti	Mg	Na	Ca	Fe	Si	C	S	K
54,8	41,4	0,2	1,8	0,2	0,4	0,5	–	–	0,7

Оксид алюминия замедляет схватывание ОФК (ортофосфорной кислоты) и переводит ее в алюмофосфатное связующее.

Высокая химическая стойкость модифицированных фосфатами алюмосиликатных и высокоглиноземистых огнеупоров обусловливается уменьшением общей пористости и образованием в порах в процессе нагрева стабильного алюмофосфата $AlPO_4$, инертного по отношению к кислым и основным средам.

Повышенная химическая стойкость фосфатных материалов объясняется специфической структурой ортофосфатов, у которых расположенные на поверхности тетраэдры PO_4 обращены в сторону расплава кислородом [2–4], связанным с центральным атомом «P» двойной связью и поэтому полностью пассивированным (рис. 1)[1].

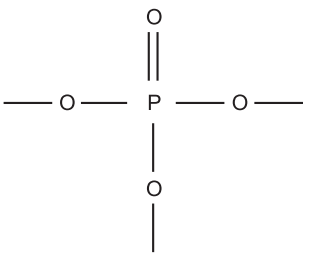


Рис. 1. Фрагмент структуры ортофосфатов

На фрагменте структуры ортофосфатов (см. рис. 1) видно, что на поверхности структурной группы располагаются ионы кислорода с полностью компенсированным зарядом. Эти соображения подтверждаются результатами наблюдений за поведением отдельных бетонных элементов футеровок печей для плавки алюминиевых сплавов. В связи с этим жаростойкие бетоны на фосфатных связующих из-за дороговизны следует применять в крайне редких случаях, т.е. в футеровках тепловых агрегатов с высокой химической агрессией и температурой.

Повышенные физико-термические показатели фосфатных связующих гарантируют им высокие температуры плавления конечных высокотемпературных фаз (фосфатов металлов).

На рис. 2 представлены зависимости температуры плавления[1] некоторых фосфатов металлов от их структурно-энергетических характеристик [2–4].

Кислые алюмофосфатные связки (АФС) типов $Al(H_2PO_4)_3$ и $Al_2(HPO_4)_3$ оказались реакционно-активными жидкостями — модификаторами не только штучных керамических огнеупоров, но и огнеупорных композитов (жаростойких бетонов гидравлического твердения). Процесс структурно-химической модификации заключался в нагнетании водорастворимых фосфатных связок в поры огнеупорных композитов[1]. При этом возможно использовать практически все технологические приемы при изготовлении так называемых бетонополимеров [2–4].

Как видно из табл. 1, 2, после обжига исследуемые отходы значительно обогащаются алюминием. Их использование на основе фосфатных позволяет получить жаростойкие композиты и кислотоупоры с высокими физико-механическими показателями.

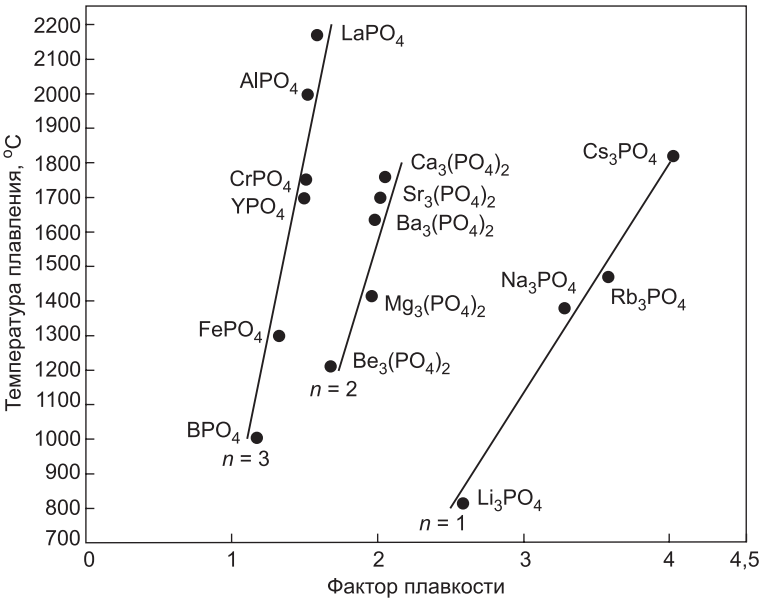


Рис. 2. Зависимость температуры плавления фосфатов металлов от их структурно-энергетических характеристик

Выводы. В целом использование высокоглиноземистого нанотехногенного сырья в композиции с фосфатными связками позволяет получать целый комплекс материалов специального назначения: жаростойкие бетоны и растворы, жидкие фосфатные связки и т.д. Данные материалы с экологической точки зрения могут быть востребованы непосредственно на тех же предприятиях, где они образовались, что является значительным шагом к переходу к безотходным технологиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абдрахимова, Е.С. Композиция для изготовления жаростойких композитов с применением алюмохромистых отходов травления алюминиевых сплавов [Текст] / Е.С. Абдрахимова, В.З. Абдрахимов // Материалы V Всерос. науч.-практ. конф. «Кадастр и геоинформационные технологии в управлении городским хозяйством». — Самара : САГМУ, 2013. — С. 9–12.
2. Хлыстов, А.И. Экологические и практические аспекты использования пиритных огарков и высокоглиноземистых отходов нефтехимии в производстве безобжиговых огнеупорных композитов [Текст] / А.И. Хлыстов, В.З. Абдрахимов, И.В. Ковков // Огнеупоры и техническая керамика. — 2009. — № 4–5. — С. 35– 42.
3. Абдрахимов, В.З. Использование железосодержащих и высокоглиноземистых техногенных образований в производстве безобжиговых огнеупорных композитов [Текст] / В.З. Абдрахимов, А.И. Хлыстов // Строительный вестник Российской инженерной академии. — 2010. — Вып. 11. — С. 108–115.
4. Абдрахимов, В.З. Использование техногенных образований в производстве безобжиговых огнеупорных композитов [Текст] / В.З. Абдрахимов, А.И. Хлыстов, В.К. Семенычев // Новые огнеупоры. — 2010. — № 5. — С. 53–59.
5. Будников, П.П. Огнеупорные бетоны на фосфатных связках [Текст] / П.П. Будников, Л.Б. Хорошавин. — М. : Металлургия, 1971. — 192 с.
6. Kingery, William D. Fundamental study of phosphate bonding in refractories: I, Literature Review [Текст] / William D. Kingery // Journal of the American Ceramic Society. — 1950. — Vol. 33. Issue 8. — P. 239–241.

АБДРАХИМОВ Владимир Закирович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: 3375892@mail.ru
Самарский государственный экономический университет
РОЩУПКИНА Ирина Юрьевна, канд. хим. наук, доц.
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (Национальный исследовательский университет)
АБДРАХИМОВА Елена Сергеевна, канд. техн. наук, доц.; E-mail: 3375892@mail.ru
Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (Национальный исследовательский университет)
КАЙРАКБАЕВ Аят Крымович, канд. физ.-мат. наук, доц.
Казахско-русский международный университет, Казахстан
КОЛПАКОВ Александр Викторович, асп.; E-mail: roland.alex@mail.ru
Самарская академия государственного и муниципального управления

Получено после доработки 20.07.15

Abdrakhimov Vladimir Zakirovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: 3375892@mail.ru, Samara State University of Economics, Russia
Roshchupkina Irina Yurjevna, candidate of chemical sciences, assistant professor, Samara State Aerospace University, Russia
Abdrakhimova Elena Sergeevna, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: 3375892@mail.ru, Samara State Aerospace University, Russia
Kayrakbaev Ajat Krymovich, candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, Kazakh-Russian International University, Kazakhstan
Kolpakov Alexander Viktorovich, post-graduate student; E-mail: roland.alex@mail.ru, Samara Academy State and Municipal Management, Russia

HEAT-RESISTANT COMPOSITE BASED PHOSPHATE BINDING AND HIGH-ALUMINA WASTE

In this research we investigate the influence of high-alumina nano raw as sludge alkaline etching and spent catalyst IM-2201 on the structure and properties of heat-resistant binding. Analyzed the development and the results of research on creating new cement-free high-resistant composites based on phosphate binding for thermal units lining. Sludge waste differ from finely-dispersed powdered materials of natural and anthropogenic origin nanoscale, which is in the range of 50 to 100 nm depending on the condition of formation.

Key words: high-resistant composite, high-alumina waste, sludge alkaline etching, phosphate binding, thermal units, lining.

REFERENCES

1. Abdrakhimova, E.S. Composition for making refractory composites with using of aluminium-chromium waste of aluminum alloys etching [Text] / E.S. Abdrakhimova, V.Z. Abdrakhimov // Materials of the V All-Russian scientific-practical conference «Cadastre and GIS technology in urban management». — Samara : SASMM, 2013. — P. 9–12.
2. Khlystov, A.I. Ecological and practical aspects of the use of pyrite cinders and high-alumina waste of petrochemical in the production of refractory nonfired composites [Text] / A.I. Khlystov, V.Z. Abdrakhimov, I.V. Kovkov // Refractories and technical ceramics. — 2009. — N 4–5. — P. 35–42.
3. Abdrakhimov, V.Z. Using of iron and high-alumina technogenic formations in the production of nonfired refractory composites [Text] / V.Z. Abdrakhimov, A.I. Khlystov // Building Bulletin of the Russian Academy of Engineering. — 2010. — Issue 11. — P. 108–115.
4. Abdrakhimov, V.Z. Using of technogenic formations in the production of nonfired refractory composites [Text] / V.Z. Abdrakhimov, A.I. Khlystov, V.K. Semenychev // New refractories. — 2010. — N 5. — P. 53–59.

5. Budnikov, P.P. Refractory concrete on phosphate ligaments [Text] / P.P. Budnikov, L.B. Khoroshavin. — M. : Metallurgy, 1971. — 192 p.
6. Kingery, William D. Fundamental study of phosphate bonding in refractories: I, Literature Review [Text] / William D. Kingery // Journal of the American Ceramic Society. — 1950. — Vol. 33. Issue 8. — P. 239–241.

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 621.878.2 : 621.396

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

К ВОПРОСУ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ ДИСТАНЦИОННОМ УПРАВЛЕНИИ МАШИНАМИ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

Исследуются возможности обработки выходных сигналов разностно-дальномерной навигационной системы для последующего согласования с исполнительными механизмами строительных и дорожных машин при автоматическом дистанционном управлении движением.

Ключевые слова: дистанционное управление, строительно-дорожные машины, навигационные системы, обработка сигналов.

Важным направлением повышения эффективности применения строительных и дорожных машин (например, в строительстве автомобильных дорог) и безопасности жизнедеятельности операторов является развитие систем дистанционного радиоуправления[1]. Для обеспечения автоматического дистанционного управления движением технологических машин дорожно-строительного комплекса может быть использован навигационный метод, основанный на измерении текущих координат машины и сопровождении ее перемещения по требуемым траекториям. Метод реализуется разностно-дальномерной системой[1, 2] с обработкой выходных сигналов на ЭВМ. Точность измерения координат объекта разностно-дальномерной системой определяется стабильностью сдвигов фаз сигналов при распространении в пространстве и в аппаратуре, а также точностью измерения сдвига фаз.

Высокой точностью измерения фазы обладают методы цифровой фазометрии [1, 2]. Наряду с обеспечением высокой точности эти методы также открывают возможность непосредственного применения вычислительных средств для обработки полученной информации и ее использования в системах дистанционного управления строительными машинами. Для обработки информации с помощью малогабаритных микропроцессорных средств необходимо предварительное преобразование аналоговых сигналов в циф-

[1] Авдеев Ю.В., Кононов А.Д., Кононов А.А. Анализ принципов дистанционного адаптивного управления землеройно-транспортными машинами // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 9. С. 41–46.

[2] Кононов А.Д., Авдеев Ю.В., Кононов А.А. Алгоритм формирования сигналов управления в системах следящего дистанционного управления землеройно-транспортными машинами // Изв. вузов. Строительство. 2010. № 1. С. 81–86.

© Авдеев Ю.В., Кононов А.Д., Кононов А.А., Варданян Н.А., 2015

ровую форму, что обеспечивается цифровым фазометром. Методы дискретной фазометрии с непосредственным цифровым представлением результата основаны на определении интервалов времени, однозначно связанных с измеряемой разностью фаз [3, 4].

Поскольку определение координат машины осуществляется с помощью информации, содержащейся в фазе сигнала, то измерение расстояний сводится к измерению сдвига фаз между сигналами передатчиков.

Каждый из измерительных каналов представляет собой интегрирующий фазометр с постоянным временем измерения, в основе действия которого лежит непосредственное преобразование величины фазового сдвига (временного интервала) в цифровой код.

Выходные сигналы счетчиков в цифровой форме, однозначно определяющие фазовый сдвиг приходящих сигналов, поступают для дальнейшей обработки на специализированное вычислительное устройство (СВУ), необходимое для автоматического управления движением машин. СВУ сравнивает текущие значения координат с заранее определенными и находящимися в памяти параметрами и в случае их расхождения подает команду на минимизацию отклонений.

Современные электрогидравлические исполнительные механизмы строительных и дорожных машин могут рассматриваться как устройства, интенсивность действия которых зависит от длительности управляющих импульсов. Следовательно, цифровой код выходной информации СВУ необходимо преобразовывать во временной интервал, чтобы исполнительные механизмы (ИМ) отрабатывали перемещение пропорционально данному коду.

К блоку преобразования выходных сигналов СВУ для согласования с исполнительными механизмами машины предъявляется ряд требований.

1. Ввиду того, что величина рассогласования может быть как положительной, так и отрицательной, блок преобразования выходных сигналов СВУ должен иметь два выхода — сигнал отработки положительный и сигнал отработки отрицательный.

2. В момент начала цикла вычисления координат машин и определения величины рассогласования между желаемым и действительным их положением, т.е. по окончании передачи информации из фазоизмерительного устройства (ФИУ) в СВУ, должен вырабатываться сигнал очередного запуска ФИУ, по которому производится следующее измерение координат машин.

3. По окончании отработки сигнала рассогласования исполнительными механизмами должен вырабатываться сигнал установки «в нуль», по которому весь цикл работы СВУ, т.е. преобразование и запись информации в вычислительный блок ФИУ, счет и обработка рассогласования, повторяется.

Основным устройством блока преобразования выходных сигналов СВУ для согласования с ИМ машин является преобразователь «код — временной интервал» («код — ширина импульса»). В настоящее время существуют две основные системы такого преобразования:

1) система «код — напряжение — временной интервал» с использованием широтно-импульсных модуляторов (ШИМ), основанных на сравнении преобразуемого во временной интервал напряжения с пилообразным напряжением;

2) дискретные системы «код — количество импульсов постоянной частоты — временной интервал».

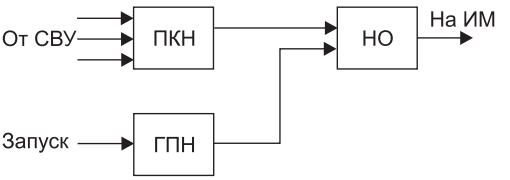


Рис. 1. Цифроаналоговая система «код — напряжение — временной интервал»

В цифроаналоговых системах «код — напряжение — временной интервал» с использованием ШИМ (рис. 1), основанных на сравнении преобразуемого во временной интервал и пилообразного напряжений, информация с выхода вычислительного блока поступает на преобразователь «код — напряжение» (ПКН) и сравнивается на входах ноль-органа (НО), выполненного обычно на операционном усилителе, с эталонным сигналом, вырабатываемым ждущим генератором пилообразного напряжения (ГПН), запускаемым по переднему фронту выходного импульса. Точность такого преобразования зависит от точности преобразования «код — напряжение», точности ноль-органа, нестабильности по длительности и линейности сигнала генератора пилообразного напряжения.

Точность преобразования «код — напряжение» зависит от точности подбора весовых коэффициентов и идентичности ключевых элементов и составляет обычно от 1 до 7–8 %.

Точность срабатывания ноль-органов зависит от величины коэффициента усиления и величины дрейфа нуля операционного усилителя. Коэффициенты усиления операционных усилителей, выполненных на интегральных схемах, от 30 000 до 500 000. Точность ноль-органов, выполненных на таких усилителях, без учета дрейфа нуля составляет от 0,04 до 4 мV. Величина дрейфа нуля операционного усилителя зависит от приведенной ко входу разности входных токов усилителя и составляет 1–10 мV/1 °С.

Нестабильность длительности сигнала ГПН зависит, главным образом, от изменения параметров полупроводниковых приборов под действием дестабилизирующих факторов (температура, старение) и составляет для точных каскадов сравнения около 0,1 %.

Лучшими точностными характеристиками обладают системы, у которых удается исключить ШИМ с генератором пилообразного напряжения и аналоговыми ноль-органами. Такими системами являются системы «код — количество импульсов с фиксированной частотой следования — временной интервал». Схема подобной системы приведена на рис. 2. Она содержит генератор эталонной частоты (ГЭЧ), счетчик (Сч), схемы совпадения кодов (ССК) счетчика и выходной информации вычислительного блока и RS-триггеры ШИМ (ТШИМ).

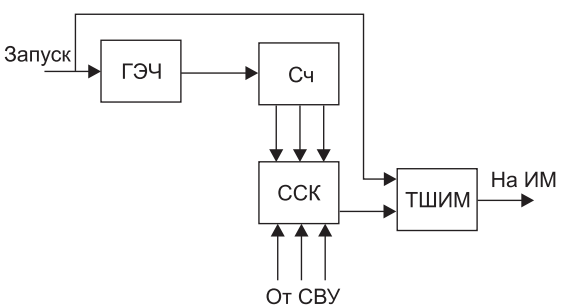


Рис. 2. Дискретная система «код — количество импульсов — временной интервал»

В момент окончания процесса счета вырабатывается сигнал выдачи информации вычислительного блока, запускается генератор эталон-

ной частоты, начинает считать счетчик, а триггер ШИМ устанавливается в положение «1». Сигналы с выходов счетчика и шин выдачи информации СВУ поступают на ССК. При совпадении кода счетчиков и кода выходной информации вычислительного блока появляется сигнал, возвращающий ТШИМ в положение «0». Таким образом, вырабатывается сигнал, длительность которого пропорциональна коду выходной информации вычислительного блока. Точность таких систем зависит исключительно от стабильности частоты эталонного генератора.

Исходя из вышеизложенных соображений блок преобразования выходных сигналов СВУ для согласования с исполнительными механизмами машин целесообразно выполнить по принципу «код — количество импульсов эталонной частоты — временной интервал» с кварцевым генератором опорной частоты. Нестабильность такого преобразования составляет 10^{-6}–10^{-12} в основном в зависимости от термостабильности кварца.

На рис. 3 представлена функциональная схема блока преобразования выходных сигналов СВУ. В общем случае она содержит:

— дешифратор выходных сигналов вычислительного блока (ДВС);
— буферную память (БП);
— счетчик до 1000 (Сч);
— схемы совпадения кодов (ССК) счетчика и буферной памяти;
— схему генератора отработки (ГО);
— триггер ШИМ (ТШИМ) в схеме ГО;
— определитель знака рассогласования (ОЗ) в схеме ГО;
— генератор эталонной частоты (ГЭЧ);
— схему управления генераторами (СУГ);
— схему выработки импульса «0» в схеме ССК.

Дешифратор ДВС предназначен для преобразования выходных сигналов, поступающих с устройства управления СВУ в последовательном коде, в параллельный код, необходимый для записи информации в буферную память. БП представляет собой 12-разрядный параллельный регистр, предназначенный для хранения информации на все время отработки сигнала рассогласования.

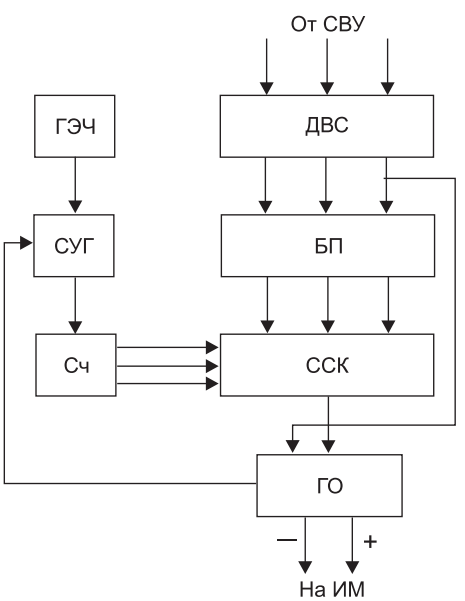


Рис. 3. Функциональная схема блока преобразования

Генератор обработки ГО через СУГ, на которую поступает также сигнал с ГЭЧ, запускает счетчик Сч на время обработки сигнала рассогласования по окончании записи в регистр БП.

Счетчик Сч представляет собой совокупность трех последовательных декадных счетчиков и предназначен для преобразования количества импульсов ГО в цифровой код.

Схемы совпадения кодов Сч и БП вырабатывают сигнал $U_{совп}$, сбра-

сывающий в «0» триггер ШИМ. ТШИМ в схеме ГО устанавливается в «1» по окончании импульса записи в БП старшего разряда сигнала рассогласования. При этом формируется передний фронт импульса рассогласования, определяющий время работы ИМ машины. Задний фронт импульса формируется по $U_{совп}$.

Определитель знака рассогласования ОЗ в схеме ГО представляет собой дешифратор, аналогичный дешифратору выходных сигналов вычислительного блока, и триггер буферной памяти знака. При совпадении положительных уровней сигналов с одного из плеч триггера буферной памяти знака и дешифратора знака на соответствующем выходе ОЗ рассогласования (положительном или отрицательном) появляется импульс рассогласования.

Схема выработки импульса «0» по заднему фронту импульса рассогласования формирует импульс «0», сбрасывающий все триггеры блоков преобразования выходных сигналов СВУ для согласования с ИМ машин и устройства преобразования выходных сигналов фазоинвертирующего устройства в «0». При этом рабочий цикл всего СВУ повторяется сначала.

Предлагаемый вариант устройства обработки выходных сигналов разностно-дальномерной системы для согласования с ИМ, реализованный с применением элементов дискретной микроэлектроники, обладает высокой стабильностью, большим динамическим диапазоном, высоким быстродействием и возможностью гибкой оперативной перестройки параметров системы при необходимости изменения характера рабочих процессов машин дорожно-строительного комплекса.

Проведенные исследования могут быть полезны разработчикам систем дистанционного управления машинами в дорожном строительстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Авдеев, Ю.В. Устройство цифровой обработки выходных сигналов координатомерной системы для дистанционного управления землеройно-транспортными машинами [Текст] / Ю.В. Авдеев, А.Д. Кононов, А.А. Кононов и др. // Изв. вузов. Строительство. — 2011. — № 10. — С. 74–79.
2. Авдеев, Ю.В. Метод компенсации погрешностей измерения координат при автоматическом дистанционном управлении машинами дорожно-строительного комплекса [Текст] / Ю.В. Авдеев, А.Д. Кононов, А.А. Кононов и др. // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 8. — С. 75–80.
3. Авдеев, Ю.В. Сравнительный анализ фазовых методов определения координат в задачах дистанционного автоматического управления машинами дорожно-строительного комплекса [Текст] / Ю.В. Авдеев, А.Д. Кононов, А.А. Кононов и др. // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 1. — С. 86–93.
4. Кононов, А.Д. Разработка алгоритма определения координат и сигнала рассогласования в задаче автоматического управления мобильными объектами в дорожном строительстве [Текст] / А.Д. Кононов, А.А. Кононов // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Серия: Системный анализ и информационные технологии. — 2014. — № 1. — С. 84–89.

АВДЕЕВ Юрий Валентинович, канд. техн. наук, доц.
Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
КОНОНОВ Александр Давыдович, канд. физ.- мат. наук, доц.
Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
КОНОНОВ Андрей Александрович, д-р техн. наук; E-mail: kniga16@mail.ru
Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

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

Получено 09.07.15

Avdeev Yuriy Valentinovich, candidate of technical sciences, assistant professor, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia
Kononov Alexander Davydovich, candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia
Kononov Andrey Alexandrovich, doctor of technical sciences; E-mail: kniga16@mail.ru, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia
Vardanyan Nara Artashesovna, post-graduate student, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

TO A PROBLEM OF SIGNAL PROCESSING OF A NAVIGATOR AT SELF-ACTING FULL REMOTE CONTROL BY MACHINES OF A ROAD-BUILDING COMPLEX

In operation the opportunities of handling of output signals a difference of a ranging navigator for the consequent coordination with operating mechanism of building and road machines are investigated at self-acting full remote control by driving.

Key words: full remote control, building road machines, navigation systems, signal processing.

REFERENCES

1. Avdeev, Yu.V. The device of numeral handling of output signals of system of measuring of coordinates for full remote control by autorgraders, scrapers and bulldozers [Text] / Yu.V. Avdeev, A.D. Kononov, A.A. Kononov etc. // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2011. — N 10. — P. 74–79.
2. Avdeev, Yu.V. Method of compensation of measuring errors of coordinates at self-acting full remote control by machines of a road-building complex [Text] / Yu. V. Avdeev, A.D. Kononov, A.A. Kononov etc. // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 8. — P. 75–80.
3. Avdeev, Yu.V. The comparative analysis of phase methods of a coordinates setting in problems of remote automatic control of machines of a road-building complex [Text] / Yu.V. Avdeev, A.D. Kononov, A.A. Kononov etc. // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 1. — P. 86–93.
4. Kononov, A.D. Development of algorithm of a coordinates setting and error signal in a problem of automatic control of mobile plants in road building [Text] / A.D. Kononov, A.A. Kononov // The Bulletin of the Voronezh State University. A series: The systems analysis and information techniques. — 2014. — N 1. — P. 84–89.

ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 626.4

А.А. АТАВИН, В.В. ДЕГТЯРЕВ, А.П. ЯНЕНКО

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СУДОПРОПУСКНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

В статье, посвященной 90-летию крупного ученого в области прикладной гидродинамики и гидравлики, гидрофизики и экологии водных объектов, доктора технических наук, профессора О.Ф. Васильева, в сжатой форме описывается часть выполненных лично О.Ф. Васильевым и его учениками исследований гидродинамических процессов в судопропускных сооружениях. Под руководством О.Ф. Васильева разрабатывались численные методы расчета волн паводков и попусков в речных руслах, волны прорыва при разрушении плотины, движения газа по трубопроводным системам, гидродинамические эффекты при перемещении самодвижущегося тела в стратифицированной среде. Возглавляемые им исследования по гидродинамическим процессам в судоходных сооружениях воплотились в создание Красноярского наклонного судоподъемника.

Ключевые слова: нестационарные процессы в судопропускных сооружениях, Красноярский наклонный судоподъемник и его исследования, пропускная способность шлюза, проектирование шлюзов, экспериментальные и натурные исследования судопропускных сооружений.

Специалистам в области прикладной гидродинамики и гидравлики известно, что еще в начале 50-х гг. прошлого столетия в Московском инженерно-строительном институте им. В.В. Куйбышева (МИСИ) О.Ф. Васильев начал теоретические и экспериментальные исследования судопропускных сооружений нового типа — наклонного судоподъемника в связи с проектированием судоходных сооружений Братского гидроузла, которые в силу различных причин не были реализованы.

После переезда в 1959 г. по приглашению академика П.Я. Кочиной в Новосибирск, в Институт гидродинамики, он продолжил начатые в МИСИ исследования по гидродинамике наклонных судоподъемников при создании высоконапорных гидроузлов. Результаты этих исследований стали основой его докторской диссертации «Вопросы гидродинамики судоходных сооружений», защищенной в 1959 г., и были реализованы при обосновании основных параметров Красноярского судоподъемника — уникального гидротехнического сооружения, аналогов которого до настоящего времени нет ни в нашей стране, ни за рубежом. Создание его позволило восстановить в 1982 г. сквозное судоходство по Енисею, прерванное строительством Красноярской ГЭС.

Возглавляемым О.Ф. Васильевым коллективом исследователей из Института гидродинамики СО АН СССР и ряда ведущих вузов г. Ново-

© Атавин А.А., Дегтярев В.В., Яненко А.П., 2015

сибирска — НИСИ (Новосибирский инженерно-строительный институт), НИИВТ (Новосибирский институт инженеров водного транспорта), НЭТИ (Новосибирский электротехнический институт), НГУ (Новосибирский государственный университет) был проведен большой цикл комплексных теоретических и экспериментальных исследований, а затем и натурных испытаний Красноярского судоподъемника, позволивший разобраться в принципиальных вопросах, связанных с транспортировкой судов в подвижной камере судоподъемника, определить основные параметры этого сооружения (судовозной камеры и гидропривода передвижения), обосновать режимы его эксплуатации, оценить преимущества судоподъемника в сравнении с традиционными шлюзами в условиях создания высоконапорных гидроузлов, т.е. осуществить полное научное обоснование этого уникального гидротехнического сооружения.

В качестве основы большинства теоретических разработок связанных колебаний воды и судна в камере или канале судопропускного сооружения использовалась полученная А.А. Атавиным под руководством О.Ф. Васильева система интегродифференциальных уравнений, включающая в себя два уравнения движения жидкости и три уравнения движения судна, которые записываются в следующем виде [1, 2]:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{б}, \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{\omega}\right) + g'\omega\frac{\partial \zeta}{\partial x} + j_x\omega = 0, \tag{2}$$

$$M_{с}\frac{d^2\eta_{с}}{dt^2} + \gamma'_{в}S_{с}\eta_{с} + \gamma'_{в}Sl_{с}\psi_{с} = \gamma'_{в}\int\limits_{x_1(t)}^{x_2(t)} b_{с}(x - x_{с})\zeta(x,t)dx + F_{и}, \tag{3}$$

$$I_{с}\frac{d^2\psi_{с}}{dt^2} + \gamma'_{в}W_{с}R_{с}\psi_{с} + \gamma'_{в}Sl_{с}\eta_{с} = \gamma'_{в}\int\limits_{x_1(t)}^{x_2(t)} (x - x_{с})b_{с}(x - x_{с})\zeta(x,t)dx + N_{и}, \tag{4}$$

$$M_{с}\frac{d^2x_{с}}{dt^2} = F_{пр} - M_{с}j_x - \gamma'_{в}\int\limits_{x_1(t)}^{x_2(t)} \Omega_{с}(x - x_{с})\frac{\partial \zeta}{\partial x}(x,t)dx, \tag{5}$$

где $\omega(x, t)$ — площадь поперечного сечения жидкости;
$Q(x, t)$ — расход жидкости;
$q_{б}$ — расход бокового притока (за счет работы распределительной системы питания шлюза, бокового притока (перелива) в камере или подходном канале);
$\zeta(x, t)$ — ордината свободной поверхности воды;
$g' = g + j_z$;
g — ускорение свободного падения;
j_z — вертикальная составляющая ускорения движения судовозной камеры судоподъемника (для шлюзов и подходных каналов $j_z = 0$);
$\gamma'_{в} = \rho_{в}g'$;

$\rho_в$ — плотность воды;
$x_2(t)$, $x_1(t)$ — продольные координаты носа и кормы судна;
$M_с$ — масса судна;
$S_с$ — площадь плоскости плавания судна;
$W_с$ — объемное водоизмещение судна;
$R_с$ — продольный метацентрический радиус судна;
$I_с$ — момент инерции массы судна относительно центральной поперечной оси;
$F_и$, $N_и$ — вертикальная составляющая и центрально-поперечный момент сил инерционного воздействия воды на судно соответственно.

Неизвестными величинами в этих уравнениях являются:
$\zeta(x, t)$ — ордината свободной поверхности воды, которая отсчитывается по вертикали от ее невозмущенной поверхности;
$Q(x, t)$ — расход жидкости;
$x_с(t)$ — продольная координата центра тяжести судна;
$\eta_с(t)$ — вертикальное смещение центра тяжести судна относительно положения покоя;
$\psi_с(t)$ — угловое наклонение судна (рис. 1).

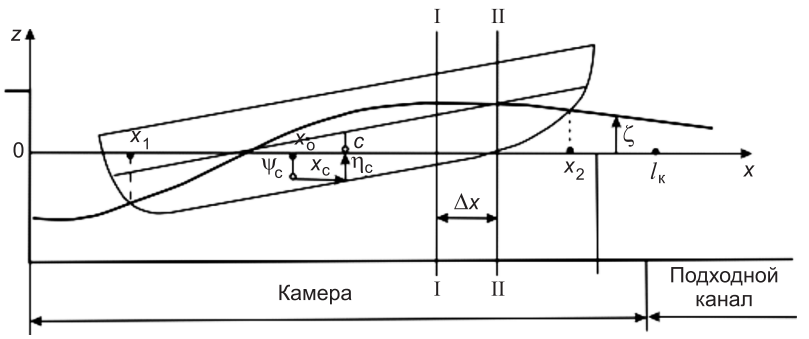


Рис. 1. Судно на возмущенной свободной поверхности

Задача о нестационарных процессах в судопропускных сооружениях в полной ее постановке, которая включает в себя указанную выше систему уравнений, а также соответствующие граничные условия, условия сопряжения и начальные условия для каждого конкретного случая, может быть решена только численными методами с помощью современных ЭВМ. Однако характерные особенности протекающих в каком-либо судопропускном сооружении процессов позволяют внести в эту постановку некоторые допущения, существенно ее упрощающие, порой настолько, что во многих интересных для практики случаях становится возможным аналитическое решение той или иной задачи.

В числе основных допущений были приняты:

— *Линеаризация*. Поскольку в камерах судопропускных сооружений колебания уровня воды и скорости ее движения весьма невелики, теория длинных волн может применяться в упрощенном виде с использованием линеаризованных уравнений и условий сопряжения.

— *Приближенный учет вертикальных и продольных угловых колебаний судна*. Пренебрегалось инерцией судна (вместе с инерцией присоединенной

массы воды) в уравнениях, описывающих вертикальные и продольные угловые колебания судна, т.е. предполагалось, что судно в своих колебаниях следует за водной поверхностью.

— *Схематизация работы причальных устройств.* Хорошим приближением к реальной картине является определение волновых процессов в камере или канале судопропускного сооружения в предположении «жесткой» учалки судна с последующим рассмотрением продольных колебаний судна с помощью уравнения (5).

С учетом приведенных выше допущений, а также других допущений, принимающихся для каждого конкретного случая, был решен ряд практических задач для различных судопропускных сооружений. Рассмотрим некоторые из них.

Гидродинамические процессы в наклонных судоподъемниках

1. *Определение параметров волн в судовозной камере наклонного судоподъемника*. Известно, что судовозная камера представляет собой прямоугольный параллелепипед шириной $B_к$, длиной $l_к$, глубиной $h_к$. Причем вода в камере находится в состоянии относительного покоя. Во время движения камеры по наклонному рельсовому пути со скоростью v_0 в случае ее мгновенной остановки (возможной, например, при обесточивании судовозной камеры) все частицы жидкости мгновенно приобретут скорость равномерного движения камеры $v_0 \cos\alpha$, тогда как на торцах камеры имеет место условие непротекания. При этом у передней (по ходу движения) торцевой стены камеры образуется положительная обратная волна, распространяющаяся к задней торцевой стенке камеры. А у задней торцевой стенки образуется прямая центрированная волна понижения, распространяющаяся к передней стенке камеры (рис. 2). Благодаря проведенному решению были получены

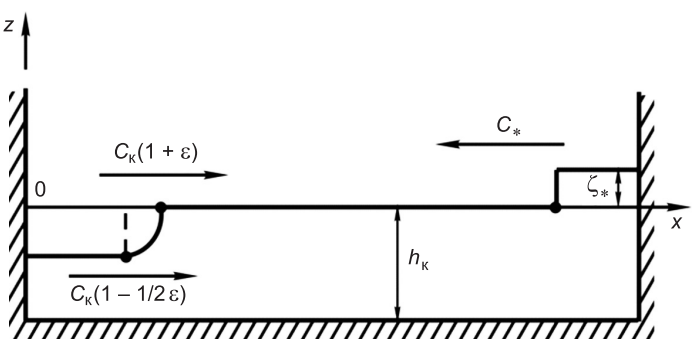


Рис. 2. Профиль свободной поверхности воды при мгновенной остановке судовозной камеры

аналитические зависимости для высоты образующихся волн ζ и скорости распространения возмущений C. Так, высота волны у передней торцевой стенки камеры определяется выражением

$$\zeta_{пр} = \varepsilon h_к \left(1 + \frac{1}{4}\varepsilon - \frac{3}{32}\varepsilon^2\right), \qquad (6)$$

а скорость распространения возмущений

$$C = c_к \left(1 - \frac{1}{4}\varepsilon + \frac{5}{32}\varepsilon^2 - \frac{1}{16}\varepsilon^3\right), \tag{7}$$

где ε — малый параметр, который определяется выражением $\varepsilon = v_0 \cos\alpha / c_к$.

Заметим, что решение этой задачи было проведено не только с использованием разложения по малому параметру ε, но и в линейном приближении.

Помимо решения задачи мгновенной остановки судовозной камеры, рассматривалась задача как для случая торможения равномерно двигающейся судовозной камеры, так и при разгоне первоначально покоящейся судовозной камеры. Для каждого конкретного процесса были получены выражения для определения параметров образующихся волн и амплитуды их максимальных колебаний.

2. *О связанных колебаниях воды и судна в камере.* Задача расчета связанных колебаний воды и судна в судовозной камере наклонного судоподъемника достаточно сложна и в полной постановке может быть решена лишь численно. С целью получения аналитических оценок основных параметров, возникающих при неравномерном движении судовозной камеры, вводились упрощающие предположения, о которых говорилось выше. Кроме них судно заменялось эквивалентным цилиндрическим телом.

В итоге были получены аналитические зависимости, с помощью которых можно находить не только отклонения уровня воды при мгновенной остановке судна, но и за счет оценки продольных перемещений неучаленного судна дать рекомендации по назначению габаритной длины камеры:

$$L_к = l_с + \frac{\varepsilon}{2}\, l_с. \tag{8}$$

3. *Расчет переходных процессов в гидроприводе судовозной камеры.* Для передвижения судовозной камеры Красноярского судоподъемника по наклонным рельсовым путям применен мощный регулируемый гидропривод, состоящий из 18 главных насосов, которые через систему маслопроводов подают рабочую жидкость — веретенное масло на 156 радиально-поршневых гидромоторов. Передвижение судовозной камеры осуществляется с помощью зубчато-реечного механизма, приводимого в действие гидроприводом.

При расчете переходных процессов в камере наклонного судоподъемника необходимая для замыкания системы уравнений (1)–(5) зависимость может быть найдена с помощью уравнения движения судовозной камеры, учитывающего специфику привода ее передвижения. При выводе этого уравнения рассматривались силы, действующие на камеру, в том числе те силы, которые передаются на камеру через зубчато-реечную передачу:

$$(M_{пр} + M_в \sin^2\alpha)\frac{dv_к}{dt} = \Phi - \psi\ \mathrm{sign}\, v_к. \tag{9}$$

В выражение (9) входят новые неизвестные — перепады давлений на гидромоторах, для определения которых необходимо рассматривать переходные процессы в гидроприводе передвижения судовозной камеры. Эта

задача распадалась на множество других, но в итоге за счет принятой в процессе расчета схематизации работы клапанов гидропривода и упрощения системы дифференциальных уравнений она позволила ответить на многие вопросы, возникающие в процессе проектирования и эксплуатации подобного типа судопропускных сооружений.

Нестационарные процессы при движении судна в камере судопропускного сооружения

1. *Задача о вводе и выводе судна из камеры судопропускного сооружения*. Работа по этой проблеме выполнялась по заданию Ленинградского отделения Института «Гидропроект» — головной организации, занимающейся проектированием уникальных гидротехнических сооружений, в соответствии с Постановлением Государственного комитета Совета министров СССР по науке и технике от 26 ноября 1970 г. за № 410. В процессе эксплуатации существующих судопропускных сооружений выяснилось, что их фактическая пропускная способность оказывается меньше расчетной, несмотря на выполнение всех расчетов в строгом соответствии с действующими на момент проектирования нормативными документами. В связи с этим О.Ф. Васильев решил, что для всестороннего изучения этого вопроса необходимо провести комплекс как теоретических, так и экспериментальных исследований. Исполнителями были Институт гидродинамики СО АН СССР и НИСИ им. В.В. Куйбышева.

В результате проведенных теоретических исследований, на основе вышеупомянутой системы интегродифференциальных уравнений, соответствующих граничных и начальных условий было установлено, что при выводе судна из камеры судопропускного сооружения существует так называемая критическая скорость вывода, превышение которой ведет к посадке судна на дно камеры. Значение этой скорости определяется аналитической зависимостью

$$V_{\text{с}}^{\text{кр}} = \frac{3}{8}\frac{h_{\text{к}} - T_{\text{с}}}{\Omega_{\text{с}}}\sqrt{g b_{\text{к}}\left(b_{\text{к}} h_{\text{к}} - \Omega_{\text{с}}\right)}, \tag{10}$$

полученной в результате приближенного решения рассматриваемой системы уравнений за счет введения некоторых упрощающих моментов.

Кроме критической скорости вывода определены аналитические зависимости для величины максимального понижения уровня воды в камере судопропускного сооружения при выводе судна и тягового усилия, необходимого для вывода судна из камеры с заданной скоростью $V_{\text{с}}$.

2. *Определение размеров поперечного сечения камеры судопропускного сооружения по условиям ввода и вывода судов*. В настоящее время размеры камер судопропускных сооружений определяют в соответствии с указаниями действующих СНиП 2.06.07–87 [3]. Однако, как показала практика эксплуатации шлюзов, скорости движения судов в камерах, запроектированных в соответствии с этими нормативными документами, оказываются меньше расчетных, что приводит к существенному снижению реальной пропускной способности шлюзов.

В результате теоретических и экспериментальных исследований установлено, что в нормативных документах не учитываются реальные волновые картины при движении судна в камере шлюза. Кроме того, при выводе судна возникает наибольшая опасность посадки его в процессе колебаний на дно камеры шлюза, поэтому случай вывода должен быть расчетным при определении габаритных размеров камер.

Для того чтобы избежать посадки судна на дно камеры шлюза, скорость его движения не должна превышать критическую скорость вывода, которая определяется зависимостью (10).

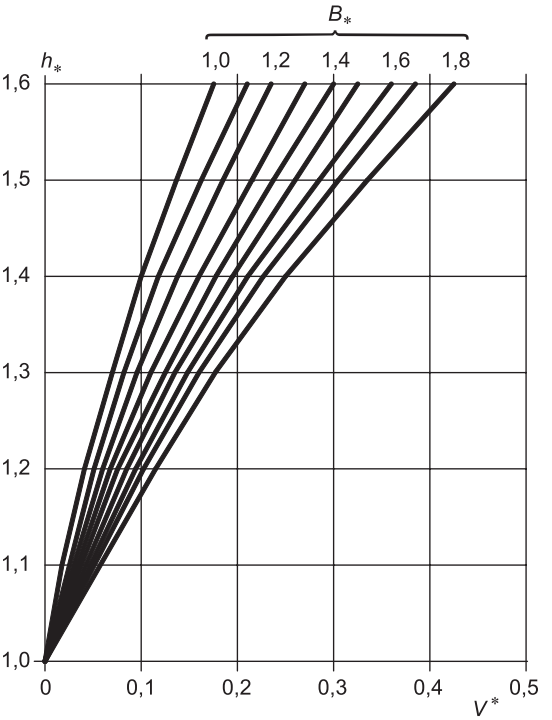


Рис. 3. График для определения размеров поперечного сечения камер судопропускных сооружений

С помощью этой зависимости, задавшись желаемой скоростью движения судна в камере V_c, можно установить размеры поперечного сечения камеры, обеспечивающие движение судна с этой скоростью. В итоге был получен график для определения размеров камер судопропускного сооружения (рис. 3).

3. *Пути увеличения пропускной способности шлюзов.* Проведенные исследования показали, что при движении судна в камере шлюза возникает так называемый «поршневой эффект», за счет которого возрастает перепад уровней между его носовой и кормовой оконечностями. Это приводит к увеличению волнового сопротивления, величина которого может быть настолько значительной, что движительные установки судна не в состоянии обеспечить движение судна с требуемой скоростью.

Для повышения скорости движения судна в камере шлюза необходимо увеличить мощность его движительных установок, либо в конструкции шлюза предусмотреть специальные механизмы заводки, которые будут помогать судну преодолевать возникающий перепад уровней, либо попытаться с помощью специальных конструктивных решений уменьшить величину перепада уровней между оконечностями судна. Это возможно осуществить с помощью боковых продольных галерей, устраиваемых за пределами камеры (рис. 4).

Заметим, что на это устройство в свое время было получено авторское свидетельство СССР. Рассмотрим, как же работает такая схема. Если происходит ввод судна в камеру шлюза, то судно вытесняет объем воды, который устремляется в камеру и повышает уровень воды в ней. Однако при наличии боковых продольных галерей вытесняемый судном объем воды будет по галереям отводиться в бьеф или соседнюю камеру. В случае вывода суд-

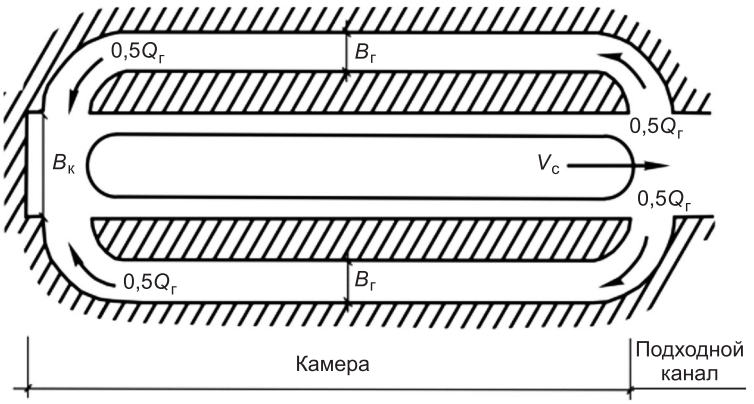


Рис. 4. Схема камеры шлюза с боковыми продольными галереями
$B_к$ — ширина камеры; $B_г$ — ширина каждой из двух продольных галерей; $Q_г$ — суммарный расход продольных галерей

на из камеры, когда происходит понижение уровня за его кормой, по этим же галереям будет подводиться вода из бьефа. Благодаря этому существенно уменьшается перепад уровней между оконечностями судна и увеличивается скорость его движения.

Проведенные теоретические исследования этого процесса позволили получить аналитические зависимости для определения площади поперечного сечения как напорных, так и безнапорных галерей. К примеру, для безнапорной галереи зависимость имеет следующий вид:

$$\omega_г^{бн}\, b_г = (\omega_к - \Omega_с) b_к \left(\frac{n-1}{2}\right)^2. \qquad (11)$$

Экспериментальные и натурные исследования гидродинамических процессов в камерах и каналах судопропускных сооружений

Как уже отмечалось, в нашей стране лабораторные исследования наклонных судоподъемников были начаты еще в 1957 г. в МИСИ под руководством О.Ф. Васильева. После создания в Новосибирске Сибирского научного центра эти исследования были продолжены в Институте гидродинамики, а также в НЭТИ, НИИВТ и НИСИ. После завершения строительства Красноярского судоподъемника на нем в 1976–1977 гг. проводились предпусковые испытания. Цель как экспериментальных, так и натурных исследований состояла в том, чтобы удостовериться в правильности полученных теоретических результатов и выдаче рекомендаций специалистам в вопросах эксплуатации подобных сооружений.

В проведении этих исследований принимал участие в различные годы коллектив сотрудников указанных выше организаций, в который входили О.Ф. Васильев, А.А. Атавин, А.В. Гусев, Ю.А. Дергачев, П.А. Дрожжин, В.В. Зыков, Е.М. Романов, Е.И. Хахилев, В.П. Сапцин, А.П. Яненко, В.В. Дегтярев и многие другие.

Необходимо отметить, что при проведении исследований приходилось решать вопросы подобия при моделировании, выбора и создания целого

комплекса измерительной аппаратуры для каждого проводимого исследования, размещения этой аппаратуры на установке или натурном объекте, синхронизации исследуемых параметров и т.д. На это требовалось много времени и средств. Был проведен комплекс испытаний, имевших большое практическое значение и подтвердивших правильность теоретических исследований. С результатами этих исследований можно ознакомиться в соответствующих публикациях [1, 2, 4–7].

В заключение заметим, что весь объем проведенных как теоретических, так и экспериментальных исследований проводился под руководством нашего учителя О.Ф. Васильева, который четко знал и понимал, в каком направлении следует идти и что необходимо сделать в каждом конкретном случае. В итоге были получены важные как в научном плане, так и в практическом приложении результаты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Атавин, А.А. О колебаниях уровня воды при выводе судна из камеры судопропускного сооружения [Текст] / А.А. Атавин, А.П. Яненко // Динамика сплошной среды. — Новосибирск, 1977. — Вып. 30. — С. 35–52.
2. Атавин, А.А. Гидродинамические процессы в судопропускных сооружениях [Текст] / А.А. Атавин, О.Ф. Васильев, А.П. Яненко. — Новосибирск : Наука, 1993.
3. СП 101.13330.2012. Подпорные стены, судоходные шлюзы, рыбопропускные и рыбозащитные сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.03.07–87 [Текст] / ОАО «Институт Гидропроект». — Санкт-Петербург, 2012.
4. Атавин, А.А. Гидродинамические аспекты нештатных и аварийных ситуаций на гидротехнических сооружениях: монография [Текст] / А.А. Атавин, В.И. Букреев, О.Ф. Васильев, В.В. Дегтярев, А.П. Яненко. — Новосибирск, 2009.
5. Атавин, А.А. Оценка возможных последствий аварий на судоходном шлюзе, связанных с разрушением его камер [Текст] / А.А. Атавин, О.Ф. Васильев // Гидравлические и гидродинамические аспекты надежности и безопасности гидротехнических сооружений: тез. докл. междунар. симп. — СПб. : Всерос. науч.-исслед. ин-т гидротехники, 2002.
6. Романов, Е.М. О некоторых результатах экспериментального исследования условий ввода судна большой грузоподъемности в камеру судопропускного сооружения [Текст] / Е.М. Романов, А.П. Яненко // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — Новосибирск, 1975. — № 10. — С. 101–104.
7. Атавин, А.А. О скоростях движения судна в камере судоходного шлюза при расчете его пропускной способности [Текст] / А.А. Атавин, А.П. Яненко // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 7. — С. 60–66.

АТАВИН Аркадий Анатольевич, канд. техн. наук, доц., директор Новосибирского филиала Института водных и экологических проблем СО РАН
ДЕГТЯРЕВ Владимир Владимирович, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
ЯНЕНКО Аркадий Петрович, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 24.07.15

Atavin Arkadiy Anatol'evich, candidate of technical sciences, assistant professor, director of Novosibirsk Branch of Institute for Water and Ecological Problems of SB RAS, Russia
Degtyarev Vladimir Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civi1 Engineering (Sibstrin), Russia
Yanenko Arkadiy Petrovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civi1 Engineering (Sibstrin), Russia

UNSTEADY PROCESSES IN NAVIGABLE HYDRAULIC STRUCTURES

In article devoted to the 90 anniversary of the outstanding scientist in the field of applied hydrodynamics and hydraulics, hydrophysics and ecology of water objects, the Doctor of technical sciences, professor O.F. Vasilyev the part executed personally by O.F. Vasilyev and his pupils of researches of hydrodynamic processes in shipping constructions is in a condensed form described. Under the leadership of O.F. Vasilyev is developed: numerical methods for calculating flood waves and discharges in river beds; break waves in the destruction of the dam; movement of gas through conduit' systems; hydrodynamic effects when moving the self-moving body in a stratified medium. Headed by it the researches on hydrodynamic processes in navigable structures were embodied in creation of the inclined elevator of the ships in Krasnoyarsk.

Key words: unsteady processes in navigable hydraulic structures, the inclined elevator of courts in Krasnoyarsk and its research, throughput of a lock, design of locks, experimental and natural studies of the constructions overlooking the ships.

REFERENCES

1. Atavin, A.A. About fluctuations of water level at a vessel conclusion from the camera of a shipping building [Text] / A.A. Atavin, A.P. Yanenko // Dynamics of the continuous environment. — Novosibirsk, 1977. — Edit. 30. — P. 35–52.
2. Atavin, A.A. Hydrodynamic processes in shipping facilities [Text] / A.A. Atavin, O.F. Vasilyev, A.P. Yanenko. — Novosibirsk : Nauka, 1993.
3. Set of Rules 101.13330.2012. Retaining walls, navigable locks, skipping fish and fish protection structures. The updated edition of Construction Norms and Regulations 2.03.07–87 [Text] / JSC «Institut Hidroproject». — St. Petersburg, 2012.
4. Atavin, A.A. Hydrodynamic aspects supernumerary and emergencies on hydraulic engineering constructions: monograph [Text] / A.A. Atavin, V.I. Bukreev, O.F. Vasilyev, V.V. Degtyarev, A.P. Yanenko. — Novosibirsk, 2009.
5. Atavin, A.A. Evaluation of possible consequences of the accidents on a navigable gateway associated with the destruction of its chambers [Text] / A.A. Atavin, O.F. Vasilyev // Hydraulic and hydrodynamic aspects of reliability and safety of hydraulic structures: Proceedings of the International Symposium. — St. Petersburg : All-Russian Research Institute of Hydraulic Engineering, 2002.
6. Romanov, E.M. About some results of experimental studies of conditions of an entrance of the vessel with big loading capacity, in the camera of navigation pass [Text] / E.M. Romanov, A.P. Yanenko // News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture. — Novosibirsk, 1975. — N 10. — P. 101–104.
7. Atavin, A.A. About speeds of the movement of the vessel in the camera of a navigable lock at calculation of its capacity [Text] / A.A. Atavin, A.P. Yanenko // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 7. — P. 60–66.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ

УДК 621.542.001

Д.Э. АБРАМЕНКОВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ, А.С. ДЕДОВ, М.П. ДМИТРИЕВ, М.С. МАЛЫШЕВ, ЧОЕН ОЛЗИЙБАЯР

ПНЕВМОУДАРНЫЙ МЕХАНИЗМ С ПЕРЕПУСКОМ МЕЖДУ КАМЕРАМИ РАБОЧЕГО И ХОЛОСТОГО ХОДА И ЕГО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

Рассматривается пневмоударный механизм с камерами перепуска со стороны камеры рабочего хода и выпуском отработавшего воздуха из камеры холостого хода.

Ключевые слова: торцевая предкамера, аккумуляционная камера, распределительная камера, камера пневматического буфера, форсаж, трубка воздухоотвода, камера холостого хода, ударник.

Введение. Статья посвящена рассмотрению рабочих процессов, описывающих выпуск отработавшего воздуха из камеры холостого хода через трубку в сквозном отверстии ударника [1–3]. При этом рассматриваются процессы пневмоударных механизмов с различными признаками-элементами, определенными таблицей классификационных признаков-элементов [4]. При всей внешней схожести пневмоударные механизмы при реализации одинаковых по величине основных параметров: энергии и частоты ударов, расходе воздуха и массы ударника представляют собой оригинальные конструкции, созданные с применением известных признаков-элементов [4].

Рассмотрим наиболее типичные конструкции пневмоударных механизмов, соответствующих проблеме снижения удельного расхода воздуха за период одного рабочего цикла.

Цель и задачи поиска принципиальной схемы и технологического решения пневмоударного механизма сводятся к созданию новых свойств рабочего процесса, отвечающего улучшению эксплуатационных показателей при минимизированных затратах на их реализацию [4, 5]. При проведении поиска нового технического решения используются аналоги с указанием их недостатков, причиной которых служат выбранные для реализации признаки-элементы.

Поиск и синтез нового пневмоударного механизма проведем в следующей последовательности. Применив из классификаций перечня признаков-элементов [4, 5] предпочтительные, составим физико-математическое описание рабочего процесса и сравним комбинации в уравнениях описания, что даст представление о сложности синтезированного пневмоударного механизма. Далее, применив инженерную методику расчета [6], определим основные геометрические размеры для заданных значений основных энергетических параметров.

© Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А., Дедов А.С., Дмитриев М.П., Малышев М.С., Олзийбаяр Чоен, 2015

Аналоги пневмоударных механизмов по распределению воздуха между рабочими камерами. Отметим недостатки, которые необходимо частично или полностью исключить в рабочем процессе пневмоударного механизма.

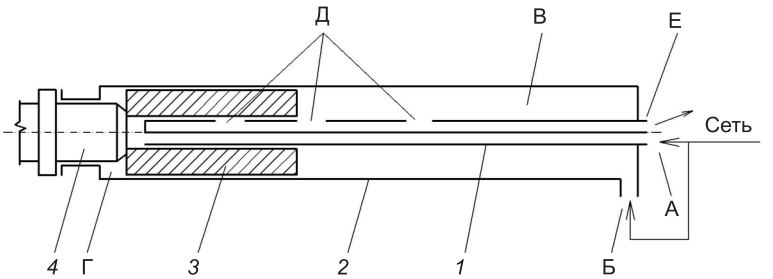


Рис. 1. Пневматический механизм [1]

Пневматический молоток [1] (рис. 1) устроен и функционирует следующим образом.

Сжатый воздух из сети по дроссельным каналам А в трубке *1* и Б в цилиндре *2* постоянно поступает в управляемые камеры рабочего В и холостого Г хода цилиндра.

Опорожнение камер В и Г осуществляется попеременно, в зависимости от положения ударника *3*, через ярус дросселей Д и выпускной канал Е в трубке.

Под действием разности силовых импульсов со стороны камер В и Г ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по инструменту 4 [1].

Недостатком технического решения [1] является система воздухораспределения отработавшего воздуха: канал воздухоотвода в атмосферу имеет коленчатое окончание и разветвленное решение в виде веера каналов меньшего поперечного сечения с кольцевым сборником и отдельными каналами вывода воздуха в атмосферу, что обусловливает ступенчатое сжатие – расширение, увеличение местных сопротивлений и приводит к недовыпуску воздуха из камеры холостого хода, а следовательно, повышению противодавления воздуха в камере, преждевременное торможение ударника и снижение его кинетической энергии перед соударением с хвостовиком инструмента.

Пневматический молоток [2] (рис. 2) устроен и функционирует следующим образом.

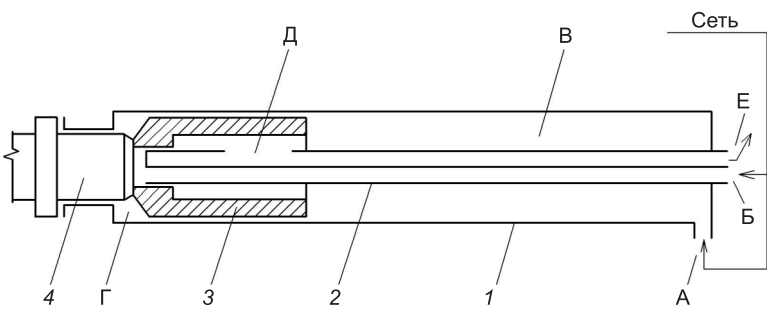


Рис. 2. Пневматический механизм [2]

Сжатый воздух из сети по дроссельным каналам А в цилиндре *1* и Б в трубке *2* поступает в управляемые камеры рабочего В и холостого Г хода.

Опорожнение камер В и Г осуществляется попеременно, в зависимости от положения ударника *3*, через щелевой дроссель Д и выпускной канал Е в трубке.

Под действием разности силовых импульсов со стороны обеих камер ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по инструменту 4 [2].

Недостатками технического решения [2] являются: трубка выполнена двухканальной, один из каналов предназначен для воздухоподвода в камеру холостого хода, другой канал воздухоотводящий с существенно большим проходным сечением, чем воздухоподводящий, что приводит к увеличению диаметрального сечения трубки и ударника, а следовательно, их масс;

— для снижения массы ударника он выполнен с внутренней проточкой со стороны камеры рабочего хода, что снижает прочность его стенок и устойчивость движения со стороны стержня;

— канал воздухоотвода в атмосферу имеет коленчатое окончание, что обусловливает увеличение местных сопротивлений на выпуске и затрудняет полное опорожнение камеры холостого хода.

Техническое решение пневматического механизма [3] (рис. 3) устроено и функционирует следующим образом.

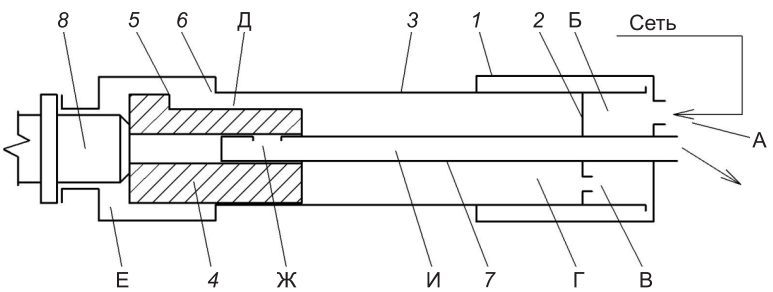


Рис. 3. Пневматический механизм [3]

Сжатый воздух из сети по выпускному каналу А в стакане *1* поступает в торцевую предкамеру Б, откуда по дроссельному каналу В в фланце *2* в камеру Г рабочего хода, образованную в цилиндре *3*, и далее, в зависимости от положения ударника *4* и отсекающих кромок *5* на ударнике и *6* на цилиндре, по его перепускному каналу Д на боковой поверхности ударника в камеру Е холостого хода.

Опорожнение камеры Г осуществляется в атмосферу только через камеру Е и в зависимости от положения ударника, посредством выпускного радиального канала Ж в трубке и его продольного продолжения в виде канала И.

Под действием разницы силовых импульсов давления воздуха со стороны камер Г и Е ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по хвостовику инструмента *8* [3].

Пневматическому механизму [3] свойственны следующие недостатки. Камеры рабочего и холостого хода наполняются резко, чем создаются условия возрастания противодавления воздуха в них, что обусловливает при рабочем ходе резкое торможение ударника, снижение предударной скорости и потерю им кинетической энергии удара. При холостом ходе со стороны камеры рабочего хода возрастает противодавление воздуха на торец ударника, что приводит к потере импульса сил давления со стороны холостого хода, преждевременное торможение и остановку ударника.

Следствием приведенных недостатков является снижение КПД использования внутренней энергии воздуха в рабочем процессе, поскольку при сохранении количества расхода воздуха снижается энергетический показатель процесса — энергия удара, которая является главным параметром пневмоударного механизма.

Синтез пневмоударного механизма предусматривает исключение полностью или частично резкой подачи сжатого воздуха из торцевой предкамеры в камеру рабочего хода, а следовательно, из нее в камеру холостого хода путем более глубокого расширения воздуха со стороны камеры рабочего хода, этим повысить КПД использования его внутренней энергии и повысить энергию единичного удара, а также улучшить экономический показатель рабочего процесса пневмоударного механизма.

Техническое решение синтезированного пневмоударного механизма (рис. 4) устроено и функционирует следующим образом.

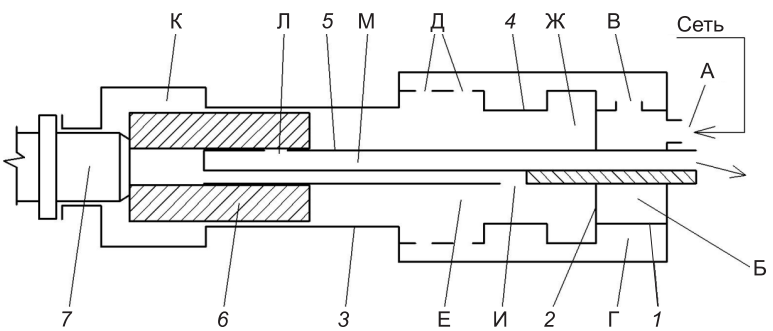


Рис. 4. Пневматический механизм [4]

Сжатый воздух из сети по каналу А впуска поступает в торцевую предкамеру Б в стакане *1*, откуда по перепускному каналу В в боковой стенке фланца *2* в кольцевую аккумуляционную камеру Г, образованную между стаканом *1* и цилиндром *3*, и по каналам Д форсажа в распределительную камеру Е, а также разделенную с ней кольцевым буртиком *4* в камеру Ж пневматического буфера и одновременно по перепускному каналу И на боковой поверхности трубки *5* в камеру К холостого хода.

Опорожнение камер Е и Ж осуществляется в атмосферу только через камеру К в зависимости от положения ударника *6*, взаимодействующего с радиальным выпускным каналом Л в трубке с его продольным положением в виде канала М.

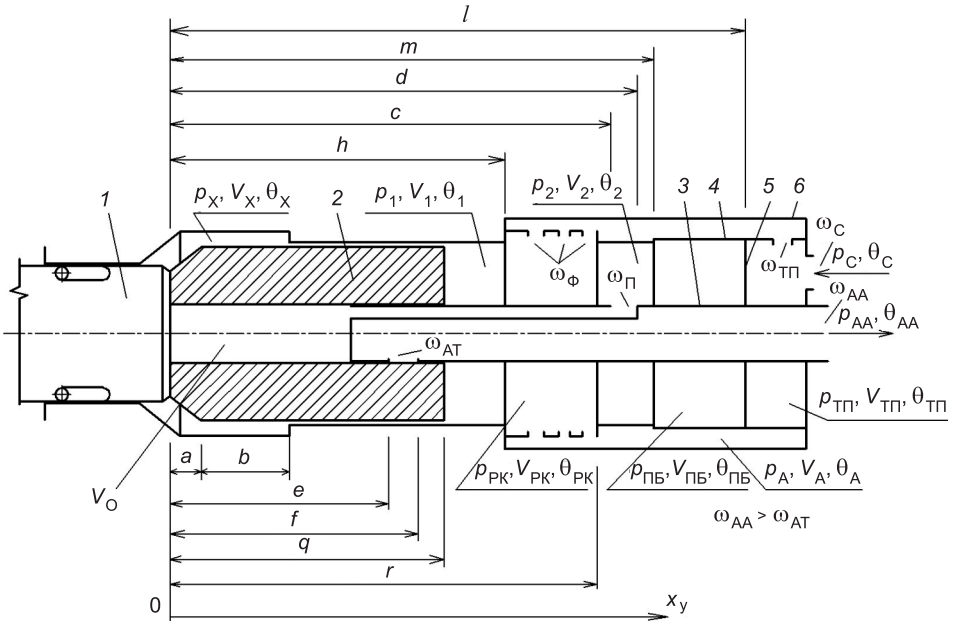


Рис. 5. Расчетная схема синтезированного пневмоударного механизма

1 — хвостовик инструмента; *2* — ударник; *3* — трубка; *4* — цилиндр; *5* — фланец; *6* — стакан

Под действием разницы силовых импульсов давления воздуха со стороны камер К, Е и Ж ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по хвостовику инструмента *7*.

Предварительную качественную оценку рабочему процессу синтезированного пневмоударного механизма можно дать по его физико-математическому описанию, применив краткое описание (см. рис. 4), составив расчетную схему (рис. 5) и введя соответствующие обозначения, которые сводятся к следующему.

Обозначения:

$V_{ТП}$, $V_А$, $V_{РК}$, $V_{ПБ}$, $V_Х$, V_1, V_2 — объем торцевой предкамеры и объемы камер: аккумуляционной, распределительной, пневматического буфера, холостого хода, между холостого хода и распределительной, между распределительной и пневматического буфера;

$\omega_С$, $\omega_{ТП}$, $\omega_Ф$, $\omega_П$ — проходные сечения каналов впуска из сети и в камеры с объемами $V_{ТП}$, $V_А$, $V_{РК}$, $V_{ПБ}$, $V_Х$, V_1, V_2;

$\omega_{АТ}$, $\omega_{АА}$ — проходные площади сечений выпускных каналов из камеры с объемами $V_Х$ и $V_О$ в атмосферу;

$\theta_{АА}$, $\theta_С$, $\theta_{ТП}$, $\theta_А$, $\theta_{КР}$, θ_1, $\theta_Х$, θ_2, $\theta_{ПБ}$ — температура воздуха в атмосфере, сети и камерах с объемами $V_{ТП}$, $V_А$, $V_{КР}$, V_1, $V_Х$, V_2, $V_{ПБ}$;

$P_{АА}$, $P_С$, $P_{ТП}$, $P_А$, $P_{КР}$, P_1, $P_Х$, P_2, $P_{ПБ}$ — давление воздуха в атмосфере, сети и камерах с объемами $V_{ТП}$, $V_А$, $V_{КР}$, V_1, $V_Х$, V_2, $V_{ПБ}$;

$\varphi_{АА}$, $\varphi_С$, $\varphi_{ТП}$, $\varphi_А$, $\varphi_{КР}$, φ_1, $\varphi_Х$, φ_2, $\varphi_{ПБ}$ — бародинамический коэффициент процесса в атмосфере, сети, в камерах с объемами $V_{ТП}$, $V_А$, $V_{КР}$, V_1, $V_Х$, V_2, $V_{ПБ}$;

$\Omega_{АА}$, $\Omega_С$, $\Omega_{ТП}$, $\Omega_А$, $\Omega_{КР}$, Ω_1, $\Omega_Х$, Ω_2, $\Omega_{ПБ}$ — термодинамический коэффи-

циент процессов в атмосфере, сети, в камерах с объемами $V_{ТП}$, $V_А$, $V_{КР}$, V_1, $V_Х$, V_2, $V_{ПБ}$;

$W = (2 \cdot k \cdot R/(k-1))^{1/2}$, где k, R — показатель процесса и газовая постоянная;

$S_у$, $m_у$, $L_у$ — рабочая диаметральная площадь, масса и длина между отсекающими кромками ударника;

$m_к$ — масса корпуса;

$k_у$, $k_к$ — коэффициенты отскока ударника от хвостовика рабочего инструмента и корпуса от буртика рабочего инструмента;

$\left(\frac{dx_у}{dt}\right)_О$, $\left(\frac{dx_у}{dt}\right)_у$ — скорости отскока и соударения ударника с хвостовиком рабочего инструмента;

$\left(\frac{dx_к}{dt}\right)_О$, $\left(\frac{dx_к}{dt}\right)_у$ — скорость отскока и соударения корпуса с буртиком рабочего инструмента;

$F_н$ — усилие нажатия на корпус молота;

$d^2x_у/dt^2$, $d^2x_к/dt^2$ — ускорения движения ударника и корпуса;

a, b, e, f, q, n, m — геометрические размеры длин между характерными отсекающими кромками.

Геометрические формы площадей сечений каналов впуска, перепуска, выпуска приняты квадратными.

Ограничения для φ_i и φ_j —

$$\varphi_i \equiv \varphi_j = \left| \begin{array}{l|l} 0{,}5283 > \frac{P_i}{P_j} & P_i \cdot \theta_i^{\frac{1}{2}} \cdot 0{,}2588, \\ 0{,}5283 \le \frac{P_i}{P_j} & P_i \cdot \theta_i^{\frac{1}{2}} \left(\left(\frac{P_i}{P_j}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_i}{P_j}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right)^{\frac{1}{2}}, \\ 0{,}5283 > \frac{P_j}{P_i} & P_j \cdot \theta_j^{\frac{1}{2}} \cdot 0{,}2588, \\ 0{,}5283 \le \frac{P_j}{P_i} & P_j \cdot \theta_j^{\frac{1}{2}} \left(\left(\frac{P_j}{P_i}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_j}{P_i}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right)^{\frac{1}{2}}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Ограничения для Ω_i и Ω_j —

$$\Omega_j = \Omega_i = \left| \begin{array}{l|l} \varphi_i > 0 & k-1, \\ \varphi_i \le 0 & k - \theta_i / \theta_j, \\ \varphi_j > 0 & k-1, \\ \varphi_j \le 0 & k - \theta_j / \theta_i. \end{array} \right. \quad (2)$$

Бародинамическая составляющая рабочего процесса для камер рабочего хода —

$$\begin{cases} \dfrac{dP_{\text{ТП}}}{dt} = \dfrac{k}{V_{\text{ТП}}}\left[W\left(\omega_{\text{С}}\varphi_{\text{С}} - \omega_{\text{ТП}}\varphi_{\text{ТП}}\right)\right]; \\ \dfrac{dP_{\text{А}}}{dt} = \dfrac{k}{V_{\text{А}}}\left[W\left(\omega_{\text{ТП}}\varphi_{\text{ТП}} - \omega_{\text{Ф}}\varphi_{\text{Ф}}\right)\right]; \\ \dfrac{dP_{\text{РК}}}{dt} = \dfrac{k}{\left(\left(V_1 + V_{\text{РК}} + V_2 + V_{\text{ПБ}}\right) - x_{\text{у}}S_{\text{у}}\right)}\left[W\left(\omega_{\text{Ф}}\varphi_{\text{Ф}} - \omega_{\text{П}}\left(x_{\text{у}}\right)\varphi_{\text{П}}\right) + P_{\text{РК}}\left(\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)S_{\text{у}}\right]; \\ \dfrac{dP_1}{dt} = \dfrac{k}{\left(\left(V_1 + V_{\text{РК}} + V_2 + V_{\text{ПБ}}\right) - x_{\text{у}}S_{\text{у}}\right)}\left[W\left(\omega_{\text{Ф}}\varphi_{\text{Ф}} - \omega_{\text{П}}\left(x_{\text{у}}\right)\varphi_{\text{П}}\right) + P_1\left(\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)S_{\text{у}}\right]; \\ \dfrac{dP_2}{dt} = \dfrac{k}{\left(\left(V_2 + V_{\text{ПБ}}\right) - x_{\text{у}}S_{\text{у}}\right)}\left[W\left(\omega_{\text{Ф}}\varphi_{\text{Ф}} \pm \omega_{\text{П}}\left(x_{\text{у}}\right)\varphi_{\text{П}}\right) + P_2\left(\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)S_{\text{у}}\right]; \\ \dfrac{dP_{\text{ПБ}}}{dt} = \dfrac{k}{\left(V_{\text{ПБ}} - x_{\text{у}}S_{\text{у}}\right)}\left[W\left(\pm\omega_{\text{П}}\left(x_{\text{у}}\right)\varphi_{\text{П}}\right) + P_{\text{ПБ}}\left(\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)S_{\text{у}}\right]. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь $\omega_{\text{П}}$, $\varphi_{\text{П}}$ — проходное сечение и бародинамический коэффициент канала перепуска.

Бародинамическая составляющая рабочего процесса для камеры холостого хода —

$$\frac{dP_{\text{ХО}}}{dt} = \frac{k}{\left(\left(V_{\text{Х}} + V_{\text{О}}\right) + x_{\text{у}}S_{\text{у}}\right)}\left[W\left(\omega_{\text{П}}\left(x_{\text{у}}\right)\varphi_{\text{П}} - \omega_{\text{АТ}}\left(x_{\text{у}}\right)\varphi_{\text{АТ}}\right) - P_{\text{ХО}}\left(\frac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)S_{\text{у}}\right], \quad (4)$$

где $V_{\text{О}}$ — объем камеры в ударнике (см. рис. 5);
$P_{\text{ХО}}$ — давление в камере с объемом $(V_{\text{Х}} + V_{\text{О}})$.

Термодинамическая составляющая рабочего процесса для камер рабочего хода —

$$\begin{cases} \dfrac{d\theta_{\text{ТП}}}{dt} = \dfrac{\theta_{\text{ТП}}}{P_{\text{ТП}}V_{\text{ТП}}}\left[W\left(\omega_{\text{С}}\varphi_{\text{С}}\Omega_{\text{С}} - \omega_{\text{ТП}}\varphi_{\text{ТП}}\Omega_{\text{ТП}}\right)\right]; \\ \dfrac{d\theta_{\text{А}}}{dt} = \dfrac{\theta_{\text{А}}}{P_{\text{А}}V_{\text{А}}}\left[W\left(\omega_{\text{ТП}}\varphi_{\text{ТП}}\Omega_{\text{ТП}} - \omega_{\text{Ф}}\varphi_{\text{Ф}}\Omega_{\text{Ф}}\right)\right]; \\ \dfrac{d\theta_{\text{РК}}}{dt} = \dfrac{\theta_{\text{РК}}}{P_{\text{РК}}\left(\left(V_1 + V_{\text{РК}} + V_2 + V_{\text{ПБ}}\right) - x_{\text{у}}S_{\text{у}}\right)} \times \\ \times\left[W\left(\omega_{\text{Ф}}\varphi_{\text{Ф}}\Omega_{\text{Ф}} - \omega_{\text{П}}\left(x_{\text{у}}\right)\varphi_{\text{П}}\Omega_{\text{П}}\right) + \left(k-1\right)P_{\text{РК}}\left(\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)S_{\text{у}}\right]; \\ \dfrac{d\theta_1}{dt} = \dfrac{\theta_1}{P_1\left(\left(V_1 + V_{\text{РК}} + V_2 + V_{\text{ПБ}}\right) - x_{\text{у}}S_{\text{у}}\right)} \times \\ \times\left[W\left(\omega_{\text{Ф}}\varphi_{\text{Ф}}\Omega_{\text{Ф}} - \omega_{\text{П}}\left(x_{\text{у}}\right)\omega_{\text{П}}\Omega_{\text{П}}\right) + \left(k-1\right)P_1\left(\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)S_{\text{у}}\right]; \\ \dfrac{d\theta_2}{dt} = \dfrac{\theta_2}{P_2\left(\left(V_2 + V_{\text{ПБ}}\right) - x_{\text{у}}S_{\text{у}}\right)}\left[W\left(\omega_{\text{Ф}}\varphi_{\text{Ф}}\Omega_{\text{Ф}} \pm \omega_{\text{П}}\left(x_{\text{у}}\right)\varphi_{\text{П}}\Omega_{\text{П}}\right) + \left(k-1\right)P_3\left(\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)S_{\text{у}}\right]; \\ \dfrac{d\theta_{\text{ПБ}}}{dt} = \dfrac{\theta_{\text{ПБ}}}{P_{\text{ПБ}}\left(V_{\text{ПБ}} - x_{\text{у}}S_{\text{у}}\right)}\left[W\left(\pm\omega_{\text{П}}\left(x_{\text{у}}\right)\varphi_{\text{П}}\Omega_{\text{П}}\right) + \left(k-1\right)P_{\text{ПБ}}\left(\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)S_{\text{у}}\right]. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь $\Omega_{\text{П}}$ — термодинамический коэффициент канала перепуска.

Термодинамическая составляющая рабочего процесса камеры холостого хода —

$$\frac{d\theta_{\text{ХО}}}{dt} = \frac{\theta_{\text{ХО}}}{\left(\left(V_{\text{Х}} + V_{\text{О}}\right) + x_{\text{у}} S_{\text{у}}\right)} \times$$

$$\times \left[W\left(\omega_{\text{П}}\left(x_{\text{у}}\right)\varphi_{\text{П}}\Omega_{\text{П}} \pm \omega_{\text{АТ}}\left(x_{\text{у}}\right)\varphi_{\text{АТ}}\Omega_{\text{АТ}}\right) - \left(k-1\right)P_{\text{ХО}}\left(\frac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)S_{\text{у}} \right], \qquad (6)$$

где $\theta_{\text{ХО}}$ — температура в камере с объемом $(V_{\text{Х}} + V_{\text{О}})$.

Баромеханическая составляющая рабочего процесса —

$$\begin{cases} \dfrac{d^2 x_{\text{у}}}{dt^2} = \dfrac{\left(P_{\text{х}} S_{\text{у}} - P_1 S_{\text{у}} - P_{\text{РК}} S_{\text{у}} - P_2 S_{\text{у}} - P_{\text{ПБ}} S_{\text{у}}\right)}{m_{\text{у}}} & \text{при } x_{\text{у}} > 0, \\ \dfrac{d^2 x_{\text{к}}}{dt^2} = \dfrac{\left(P_{\text{х}} S_{\text{у}} - P_1 S_{\text{у}} - P_{\text{РК}} S_{\text{у}} - P_2 S_{\text{у}} - P_{\text{ПБ}} S_{\text{у}} - F_{\text{н}}\right)}{m_{\text{к}}} & \text{при } x_{\text{к}} > 0. \end{cases} \qquad (7)$$

Ограничения для $x_{\text{у}}$ и $x_{\text{к}}$ —

$$\begin{cases} \left(\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)_{\text{О}} = -k_{\text{у}}\left(\dfrac{dx_{\text{у}}}{dt}\right)_{\text{у}} & \text{при } x_{\text{у}} \le 0, \\ \left(\dfrac{dx_{\text{к}}}{dt}\right)_{\text{О}} = -k_{\text{к}}\left(\dfrac{dx_{\text{к}}}{dt}\right)_{\text{у}} & \text{при } x_{\text{к}} \le 0. \end{cases} \qquad (8)$$

Ограничения для проходных сечений каналов (дросселей) впуска при $\omega_{\text{С}} = \text{const}$, $\omega_{\text{ТП}} = \text{const}$ и $\omega_{\text{ф}} = \text{const}$,

$$\begin{cases} \omega_{\text{С}} \equiv \omega_{\text{ТП}} = \omega\left(\dfrac{P_i}{P_j}\right) \equiv \omega\left(\dfrac{P_j}{P_i}\right), \\ \Sigma\omega_{\text{ф}} = z\omega\left(\dfrac{P_i}{P_j}\right) \equiv z\omega\left(\dfrac{P_j}{P_i}\right), \end{cases} \qquad (9)$$

где z — число каналов форсажа одинакового сечения.

В (9) не учтены перетечки между камерами и утечки через зазоры в атмосферу.

Ограничения для проходного сечения канала перепуска не учитывают перетечки между камерами на участке $(m - r)$ и зависят от координат участка $(d - c)$ перепуска:

$$\omega_{\text{П}} = \omega\left(\frac{P_i}{P_j}\right) \equiv \omega\left(\frac{P_j}{P_i}\right). \qquad (10)$$

Зависимости (9) работают согласно ограничениям (1) и (2).

Зависимость (10) работает с учетом координат положения ударника $\omega_{\text{П}}(x_{\text{у}})$ и ограничений (1) и (2).

Ограничения для канала перепуска и выпуска:

$$\omega_{\Pi}(x_{\text{у}}) = \left| \begin{array}{ll} x_{\text{у}} \le (c-q) & \omega_{\Pi} = \max\omega_{\Pi}, \\ (c-q) \le x_{\text{у}} < (m-q) & \omega_{\Pi} = 0{,}5\max\omega_{\Pi}, \\ x_{\text{у}} \ge (d-q) & \omega_{\Pi} = 0. \end{array} \right. \tag{11}$$

$$\omega_{\text{АТ}}(x_{\text{у}}) = \left| \begin{array}{ll} x_{\text{у}} \le e & \omega_{\text{АТ}} = 0, \\ e < x_{\text{у}} \le f & \omega_{\text{АТ}} = 0{,}5\max\omega_{\text{АТ}}, \\ x_{\text{у}} \ge f & \omega_{\text{АТ}} = \max\omega_{\text{АТ}}. \end{array} \right. \tag{12}$$

Для dP_i/dt и $d\theta_i/dt$ объемы учитываются в зависимости от перемещения ударника $x_{\text{у}}(t)$:

при длине ударника $L_{\text{у}} = q$ —

$$\begin{cases} V_1 = \dfrac{\pi D_1^2}{4} x_{\text{у}} \Big|_q^h, \\ V_{\text{РК}} = \dfrac{\pi D_{\text{РК}}}{4} x_{\text{у}} \Big|_h^r, \\ V_2 = \dfrac{\pi D_2^2}{4} x_{\text{у}} \Big|_r^m, \\ V_{\text{ПБ}} = \dfrac{\pi D_{\text{ПБ}}}{4} x_{\text{у}} \Big|_m^l, \end{cases} \tag{13}$$

где D_1 = const, $D_{\text{РК}}$ = const, D_2 = const, $D_{\text{ПБ}}$ = const.

Расход воздуха рассматриваемым механизмом находится по зависимости:

$$G_{\text{С}} = G_{\text{ТП}} = G_{\Phi} - G_{\Pi} = G_{\text{АТ}}, \tag{14}$$

где $G_{\text{С}}$, $G_{\text{ТП}}$, G_{Φ}, G_{Π}, $G_{\text{АТ}}$ — расходы через каналы постоянно открытые $\omega_{\text{С}}$, $\omega_{\text{ТП}}$, ω_{Φ} и открытые ω_{Π}, $\omega_{\text{АТ}}$ в зависимости от положения ударника.

Учет изменяющихся объемов рабочих камер $V_{\text{Х}}$, V_1, $V_{\text{РК}}$, V_2, $V_{\text{ПБ}}$ в зависимости от положения ударника обусловлен различными внутренними диаметрами цилиндра, что предусмотрено уравнениями (3)–(7).

На практике оперируют средним расходом [7] за n циклов, т.е. за время $t = nT$, где T — время одного цикла;

$$G_{\text{СР}} = t_i^{-1} \int_{t_0}^{t_0+t_i} G_i dt, \tag{15}$$

где $t_i >> T$ и $t_0 = T$.

При предварительном моделировании рекомендуется формы сечений каналов $\omega_{\text{С}}$, $\omega_{\text{ТП}}$, ω_{Φ}, ω_{Π}, $\omega_{\text{АТ}}$ принимать квадратными или круглыми, а коэффициенты расходов на впуске, перепуске и выпуске принимать равными единице, с последующим пересчетом на фактические значения после определения рациональных базовых геометрических размеров пневмоударного механизма.

Выводы по результатам поиска и технического решения: 1. Применение одних и тех же признаков-элементов для синтеза пневмоударного механизма, но в различной последовательности их взаимодействия в рабочем процессе дают различные итоговые показатели.

2. Предложенное исполнение синтезированного пневмоударного механизма с распределительной камерой со стороны рабочего хода позволяет повысить кинетическую энергию единичного удара и уменьшить удельный расход воздуха, частично или полностью исключить непроизводительную часть расхода.

3. При одинаковых заданных энергетических параметрах: энергии и частоте ударов, удельного расхода воздуха представляется возможность получить лучшие показатели по габаритам и массе пневматического молота, что обеспечивается также отсутствием каналов воздухораспределения в стенке цилиндра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А. с. 1061982 СССР. Пневматический молоток [Текст] / Э.А. Абраменков, А.Г. Богаченков, В.П. Брызгалов. — Опубл. 1983, Бюл. № 47.
2. А. с. 1172692 СССР. Пневматический молоток [Текст] / Э.А. Абраменков, А.Г. Богаченков, В.П. Брызгалов. — Опубл. 1985, Бюл. № 30.
3. Абраменков, Д.Э. Пневмоударный механизм дроссельно-бесклапанного типа и его физико-математическое описание [Текст] / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, В.А. Гвоздев, В.А. Канивец, М.С. Малышев // Изв. вузов. Строительство. — 2014. — № 8. — С. 47–62.
4. Абраменков, Э.А. Пневматические механизмы машин ударного действия: справ. пособие [Текст] / Э.А. Абраменков. — Новосибирск : Изд-во Новосиб. ун-та, 1993. — 430 с.
5. Кутумов, А.А. Навесные пневматические молоты для разработки мерзлых грунтов: монография [Текст] / А.А. Кутумов, Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков. — Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2008. — 376 с.
6. Абраменков, Э.А. Исследование пневмоударного механизма с дроссельным воздухораспределением и разработка инженерной методики его расчета [Текст] / Э.А. Абраменков, Г.Ф. Тимофеев. — Новосибирск : НТО НИСИ им. В.В. Куйбышева, 1973. — Гос. рег. № 73021180. — 96 с.
7. Абраменков, Э.А. Уравнения рабочего процесса дроссельного пневмоударного механизма [Текст] / Э.А. Абраменков // Изв. вузов. Строительство и архитектура. — 1984. — № 4. — С. 110–115.

АБРАМЕНКОВ Дмитрий Эдуардович, д-р техн. наук, проф.
Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
АБРАМЕНКОВ Эдуард Александрович, д-р техн. наук, проф.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
ДЕДОВ Алексей Сергеевич, канд. техн. наук, доц.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
ДМИТРИЕВ Михаил Петрович, асп.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
МАЛЫШЕВ Максим Сергеевич, студ.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
ОЛЗИЙБАЯР Чоен, асп.
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 10.07.15

Abramenkov Dmitriy Eduardovich, doctor of technical sciences, professor, Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia
Abramenkov Eduard Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Dedov Alexey Sergeevich, candidate of technical sciences, assistant professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Dmitriev Mikhail Petrovich, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Malyshev Maksim Sergeevich, student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Olziybayar Choen, post-graduate student, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

PNEUMATIC PERCUSSION MECHANISM WITH A BYPASS BETWEEN THE CHAMBERS OF THE WORKING AND IDLING, AND ITS PHYSICAL AND MATHEMATICAL DESCRIPTION

Considered pneumatic percussion mechanism with cameras bypass on the camera's power stroke and the exhaust of combustion air from the chamber idling.

Key words: face of the pre-chamber, an accumulation chamber, distribution chamber, pneumatic buffer, afterburner, the tube of the exhaust vent, the camera idling, the drummer.

REFERENCES

1. A. p. 1061982 USSR. Pneumatic hammer [Text] / E.A. Abramenkov, A.G. Bogachenkov, V.P. Bryzgalov. — Publ. 1983, Bull. N 47.
2. A. c. 1172692 USSR. Pneumatic hammer [Text] / E.A. Abramenkov, A.G. Bogachenkov, V.P. Bryzgalov. — Publ. 1985, Bull. N 30.
3. Abramenkov, D.E. Pneumoshock mechanism valveless throttle-type and its physico-mathematical description [Text] / D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov, V.A. Gvozdev, V.A. Kanivets, M.S. Malyshev // News of Higher Educational Institutions. Construction. — 2014. — N 8. — P. 47–62.
4. Abramenkov, E.A. Pneumatic machinery machines Impact: right. collec. [Text] / E.A. Abramenkov. — Novosibirsk : Publishing house Novosib. University, 1993. — 430 p.
5. Kutumov, A.A. Mounted pneumatic hammers development of frozen soils: monograph [Text] / A.A. Kutumov, D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov. — Novosibirsk : NSUACE (Sibstrin), 2008. — 376 p.
6. Abramenkov, E.A. Research pneumoshock mechanism to throttle air distribution and development of the engineering technique of its calculation [Text] / E.A. Abramenkov, G.F. Timofeev. — Novosibirsk : Scientific Technical Department NISI them. V.V. Kuybysheva, 1973. — Government. Reg. № 73021180. — 96 p.
7. Abramenkov, E.A. Equations workflow throttle mechanism pneumoshock [Text] / E.A. Abramenkov // News of Higher Educational Institutions. Construction and arhitektura. — 1984. — N 4. — P. 110–115.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 624.04 : 620.173.2

В.В. АДИЩЕВ, Е.В. КАРПОВ, А.Г. ДЕМЕШКИН, Ю.Р. КАРПИЦКАЯ,
В.В. МАЛЬЦЕВ, А.И. ИВАНОВ

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ CORRELATED SOLUTIONS VIC 3D ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА*

Предлагается способ интерпретации экспериментальных данных и построения нечетких аппроксимаций диаграмм деформирования бетона. Для проведения экспериментов использовалась система оптического измерения поверхностных деформаций Vic 3D. Вследствие структурной неоднородности и неустранимой внецентренности приложения нагрузки затруднительно интерпретировать полученные поля деформаций и непосредственно построить диаграммы деформирования. Становится очевидной необходимость представления диаграмм деформирования в виде нечетких функций. Для построения кривых используется алгоритм аппроксимации сплайн-функциями. Узлы интерполяции выбираются с помощью кластерного анализа.

Ключевые слова: диаграмма деформирования, нечеткие функции, бетон, Correlated Solutions Vic 3D.

Бетон и железобетон являются структурно-неоднородными материалами. При этом бетон представляет собой многофазную среду: цементный камень, заполнители, имеющие различные физико-механические характеристики. Реологические свойства бетонной смеси, прочность и деформативность бетона в значительной степени зависят от вида, крупности и формы песка и щебня (гравия), плотности упаковки их в единице объема, водоцементного соотношения. В известной монографии [1] приведены физические свойства заполнителей, влияющие на технологические параметры бетона, рассмотрено влияние различных способов воздействия на бетонную смесь, обусловливающих деформативность и прочность бетона. Очевидно, все приведенные факторы — случайные величины и процессы. Физико-механические характеристики бетона (прочность, предельные деформации при растяжении и сжатии) определяют экспериментально. В расчете конструкций применяют так называемые диаграммы деформирования бетона. При этом диаграммы деформирования бетона должны быть трансформированы в зависимости от вида напряженного состояния [2]. Узлы интерполяции, необходимые для построения аппроксимирующих функций, определяются экспериментально. Проблема заключается в том, что разброс экспериментальных данных очень велик. Попытки статистической обработки опытных данных показали, что во многих случаях нормальному закону распределения не удовлетворяет более 50 % данных. В работе [3] предложен альтернативный вероятностно-статистическому подходу метод построения диаграмм деформирования в виде нечетких функций [4–6]. В данной работе

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 13-08-00633.

© Адищев В.В., Карпов Е.В., Демешкин А.Г., Карпицкая Ю.Р., Мальцев В.В., Иванов А.И., 2015

предлагается способ интерпретации экспериментальных данных и построения нечетких аппроксимаций диаграмм.

Оптическая система Vic 3D позволяет строить экспериментальные поля перемещений и деформаций, возникающих при нагружении твердых тел [7, 8]. Но изополя, полученные при испытании бетонных образцов, имеют сложный вид вследствие неоднородности материала и геометрических несовершенств. При испытаниях на осевое сжатие и растяжение дополнительно по указанным причинам избавиться от внецентренности нагружения практически невозможно.

В данной работе испытывается серия бетонных и железобетонных призм на осевое сжатие. Образцы для испытания (рис. 1) имеют квадратное поперечное сечение размерами 40×40 (b×h) мм и высоту 140 мм. Деформации измеряются с помощью оптической системы Correlated Solutions Vic 3D.

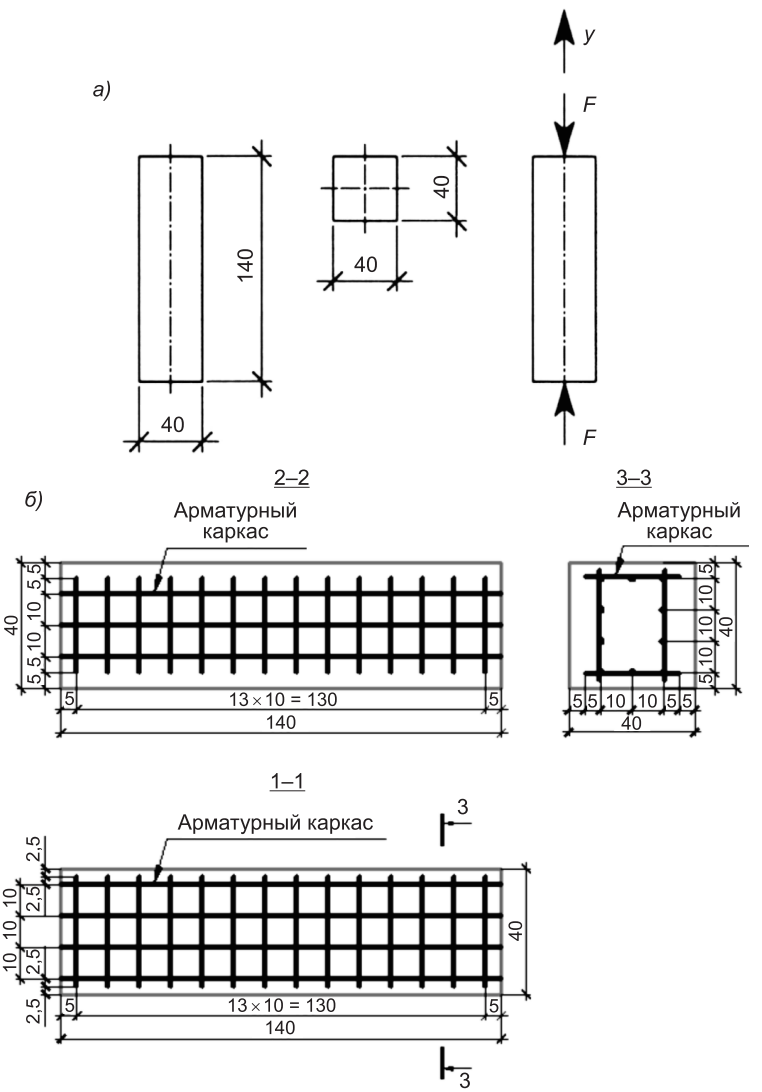


Рис. 1. Конструкции опытных образцов и схема нагружения
а — бетонный, *б* — железобетонный

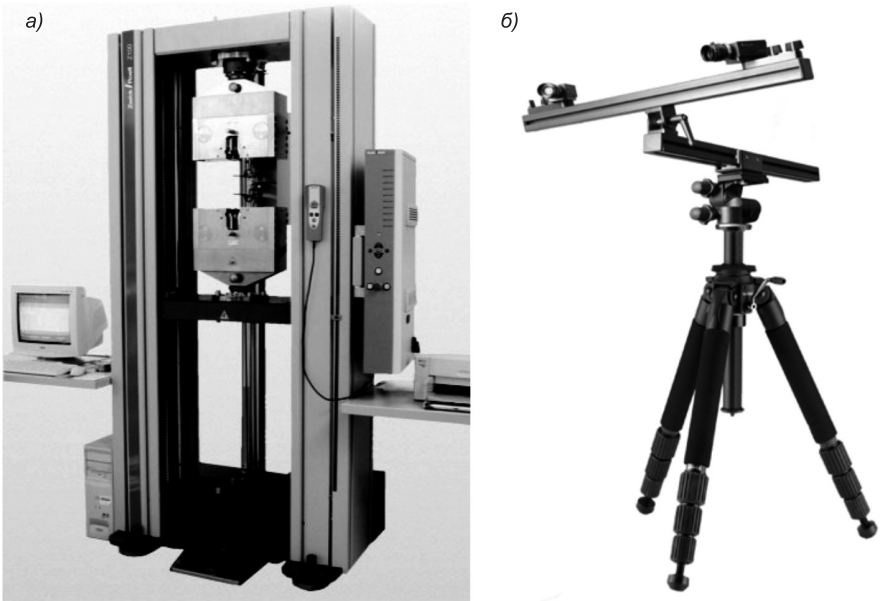


Рис. 2. Оборудование для проведения экспериментов
а — разрывная машина Zwik/Roell z100; *б* — оборудование для съемки Vic 3D

Нагрузка для бетонных и железобетонных образцов задавалась перемещениями траверсы испытательной машины со скоростью 1 и 0,1 мм/мин.

Испытания образцов проводились на универсальной испытательной машине Zwik/Roell z100 с максимальной прилагаемой нагрузкой до 100 кН (рис. 2, *а*). Для экспериментального исследования деформированного состояния образцов использовалась система оптического измерения поверхностных деформаций Correlated Solutions Vic 3D (рис. 2, *б*). Система позволяет получить поля деформаций и перемещений на поверхности образцов с помощью предварительно нанесенной на поверхность реперной сетки (рис. 3).

По результатам испытаний бетонных и железобетонных призм получены графики зависимости $\sigma - \Delta_{захв}$ и $\sigma - \varepsilon$ (рис. 4).

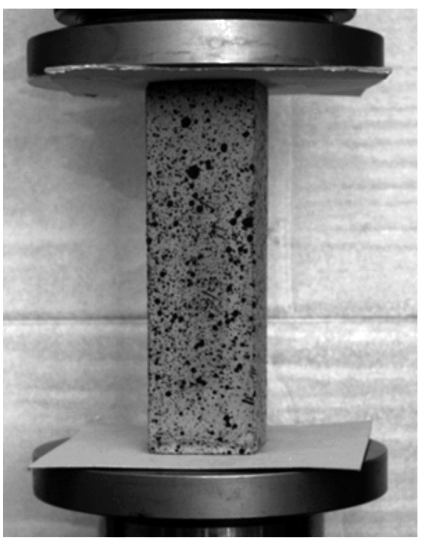


Рис. 3. Схема испытания опытных образцов

В ходе проведения эксперимента было выявлено, что при испытании призм на сжатие практически невозможно избежать внецентренности нагружения и получить равномерные распределения деформаций. Полученные поля деформаций в образцах существенно неоднородные, поэтому некорректно использовать диаграммы, представленные на рис. 4, *б*.

При обработке изображений в Correlated Solutions Vic 3D на полях деформаций возникает сильная рябь (рис. 5, *а*). Для сглаживания вычисленных деформаций используются локальные фильтры (рис. 5, *б*). Сглаживающий

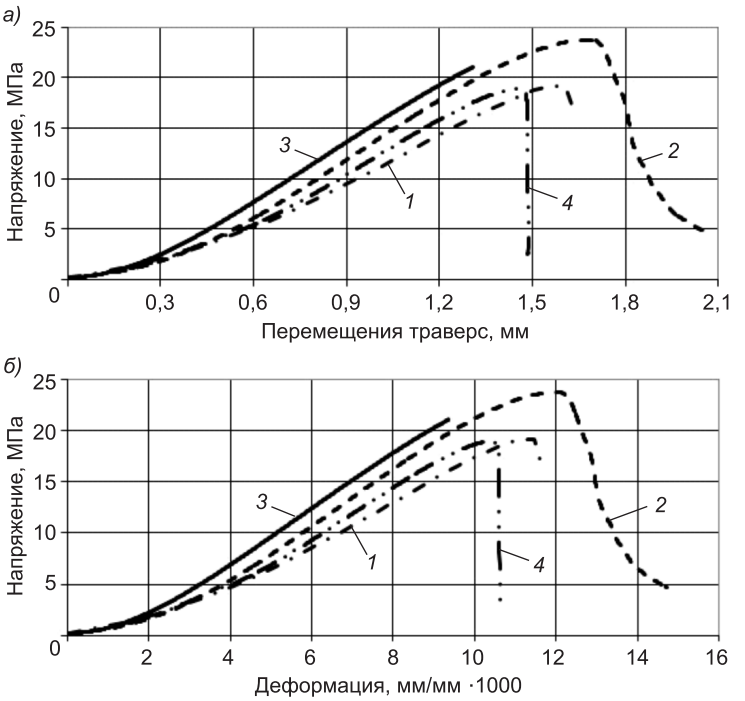


Рис. 4. Зависимость напряжений от перемещения захватов, полученная при испытании призм (*а*); условная диаграмма деформирования призм (*б*)

1 — 1б; *2* — 1жб; *3* — 2жб; *4* — 2б

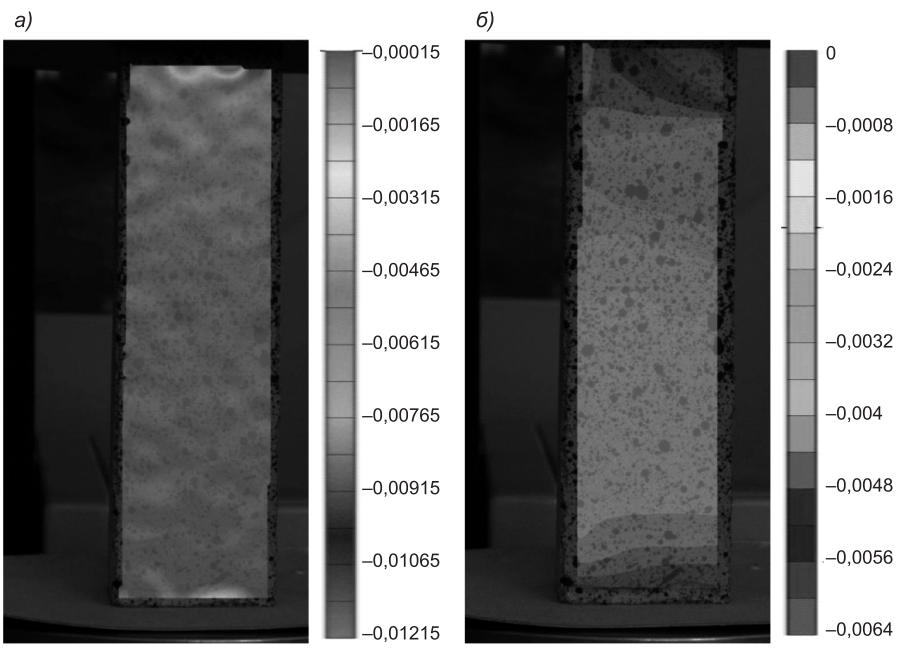


Рис. 5. Поле распределения продольных деформаций в бетонной призме

а — без применения фильтров, *б* — с применением фильтров

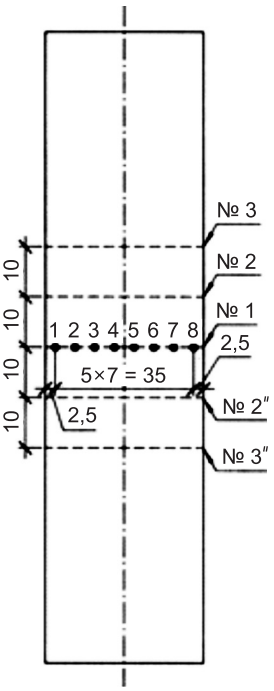


Рис. 6. Схема расположения характерных точек поперечных сечений

фильтр взвешен по центральной частоте и имеет Гауссов тип. Значения деформаций зависят от расчетной сетки, в пределах которой выполняется сглаживание, а также от величины шага, используемого при корреляционном анализе.

При обработке экспериментальных данных рассматривались характерные точки поперечных сечений образцов (рис. 6). Расстояние между характерными точками 5 мм, что сопоставимо с расчетной сеткой, используемой в системе Correlated Solutions Vic 3D при построении полей деформации. Расстояние между сечениями 10 мм.

На рис. 7 представлены графики распределения деформаций в центральном поперечном сечении (см. рис. 6, сечение № 1) в бетонных призмах для скоростей нагружения 1 и 0,1 мм/мин.

Результаты экспериментов показывают, что значительная внецентренность возникает при малой скорости нагружения (рис. 7, *б*).

Для исключения внецентренности на каждой ступени нагружения применяется следующий алгоритм исключения изгибной составляющей деформации. На рис. 8 представлено распределение деформаций по центральному сечению (пунктирная линия). Очевидно, что с достаточной точностью это распределение может быть аппроксимировано линейным распределением (сплошная линия).

1. Находится средняя деформация по значениям крайних характерных точек 1 и 8 поперечного сечения (см. рис. 8):

$$\varepsilon_{ср} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_8}{2}.$$

Вычисление средней деформации по всем зарегистрированным значениям в сечении дает результат, практически не отличающийся от средней деформации $\varepsilon_{ср}$.

2. Изгибная составляющая деформации, возникающая в результате неконтролируемой внецентренности нагружения, описывается линейной эпюрой (заштрихованная область на рис. 8).

3. Вычитание из исходного распределения (пунктирная линия) изгибной составляющей дает эпюру распределения деформаций по сечению с исключенной внецентренностью.

Сравнение распределений деформаций в центральном поперечном сечении призм (см. рис. 6, сечение № 1) при разных ступенях нагружения до и после исключения внецентренности представлено на рис. 9.

Внецентренность возникает не только из-за геометрических погрешностей, но и вследствие неоднородности материала. Поэтому становится очевидной необходимость представления диаграмм деформирования в виде нечетких функций. Суть предлагаемого метода состоит в следую-

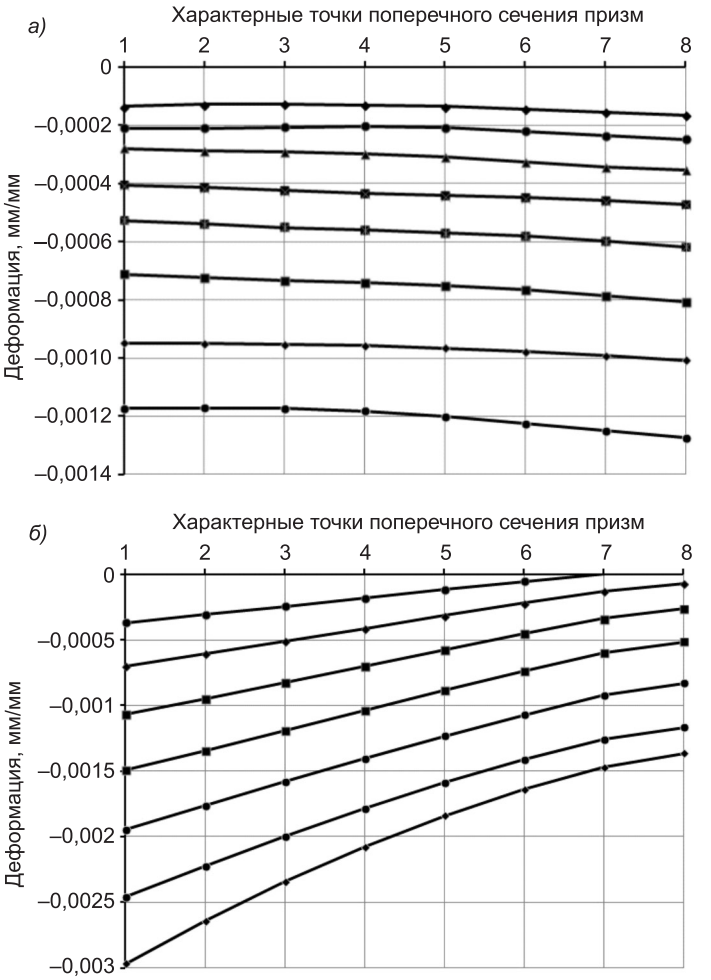


Рис. 7. Графики распределения деформаций в центральном поперечном сечении (сечение № 1) бетонных призм при разных ступенях нагружения

а — призма № 1 (1 мм/мин), *б* — призма № 2 (0,1 мм/мин)

щем: с помощью алгоритмов кластеризации [9] определяются интерполяционные узлы аппроксимирующих функций как нечеткие величины, а затем строятся функция-мажоранта и функция-миноранта.

Большинство алгоритмов кластеризации не опирается на традиционные для статистических методов допущения — они могут использоваться в условиях почти полного отсутствия информации о законах распределения данных. Кластеризацию проводят для объектов с количественными (числовыми), качественными или смешанными признаками.

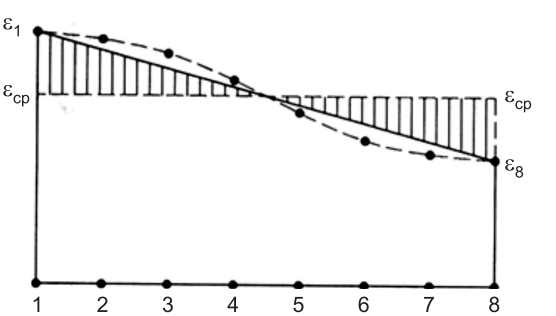
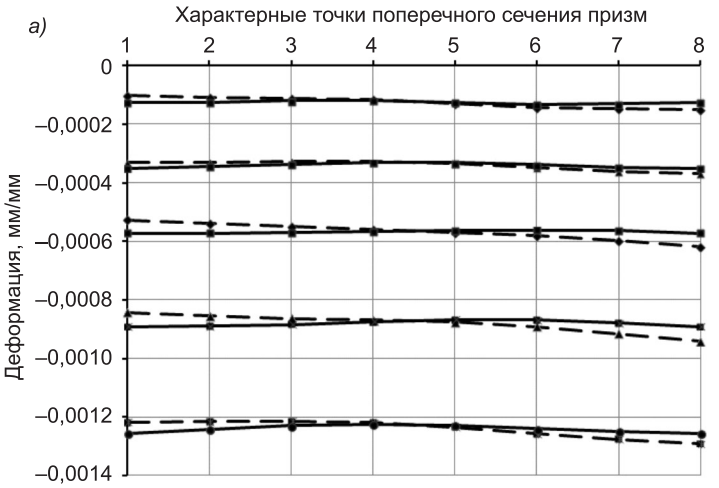
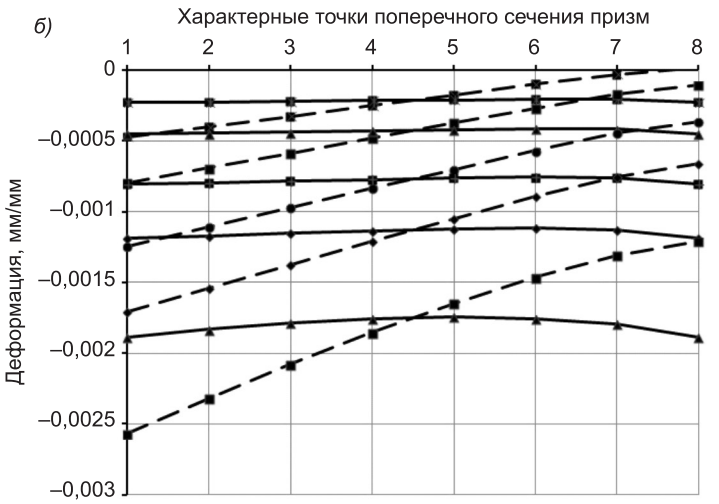


Рис. 8. Эпюры распределения деформаций

пунктирная линия — распределение деформаций в сечении до исключения изгибной составляющей, заштрихована эпюра изгибной составляющей





В данной работе из широкого класса иерархических и плоских, четких и нечетких алгоритмов кластеризации [9] выбраны методы кластеризации для объектов с количественными признаками: обобщенный алгоритм нечетких *c*-средних и алгоритм горной кластеризации. Реализован наиболее эффективный и приемлемый в условиях практического использования и в рамках корректной постановки физических задач метод субтрактивной кластеризации. Существенным его достоинством является итерационное отыскание необходимого количества прототипов центров кластеров, обусловленное заданным ограничительным порогом. В нашем случае этот порог задается необходимым числом узлов интерполяции. Рассмотрим схематичную диаграмму деформирования бетона с наименьшим количеством узлов интерполяции (рис. 10).

Диаграмма растяжения–сжатия бетона (см. рис. 10) аппроксимируется на участках 1–6 следующим образом:

участок 1–2: $\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_2 + b_2 \cdot (\varepsilon_2 - \varepsilon)^{m_2}$;

участок 2–3: $\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_3 + E_b \cdot (\varepsilon - \varepsilon_3) + b_3 \cdot (\varepsilon_3 - \varepsilon)^{m_3}$;

участок 3–4: $\sigma_b(\varepsilon) = E_b \cdot \varepsilon$;

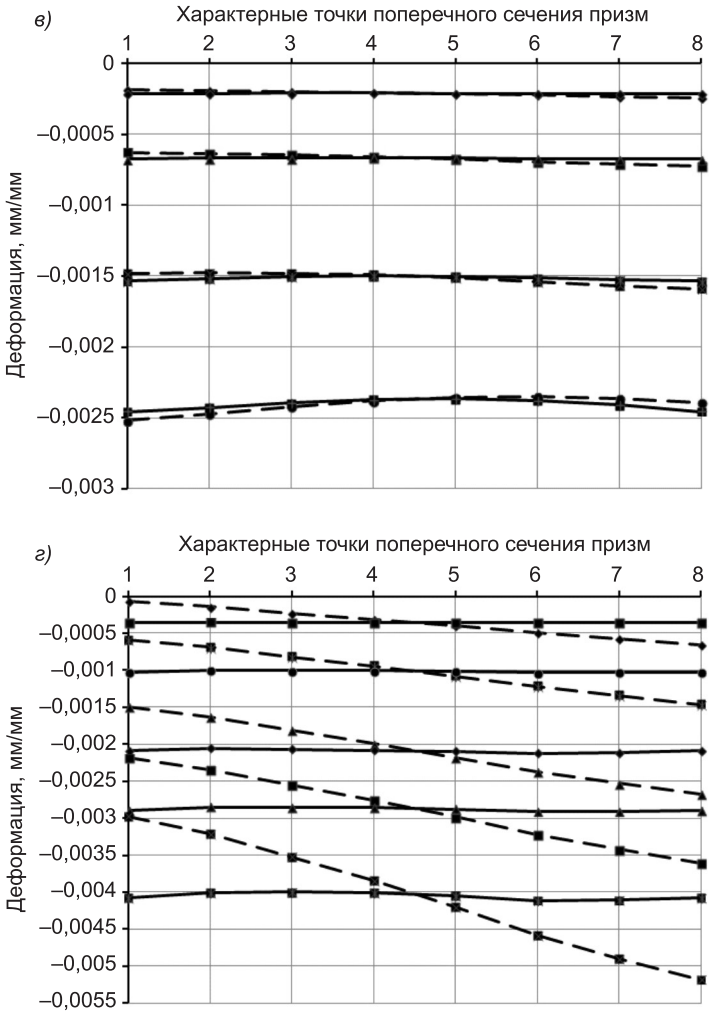


Рис. 9. Распределения деформаций в центральном поперечном сечении (сечение № 1) в бетонных и железобетонных призмах при разных ступенях нагружения до (пунктирная линия) и после (сплошная линия) исключения внецентренности

а — бетонная призма № 1 (1 мм/мин); *б* — бетонная призма № 2 (0,1 мм/мин); *в* — железобетонная призма № 2 (1 мм/мин); *г* — железобетонная призма № 1 (0,1 мм/мин)

участок 4–5: $\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_4 + E_b \cdot (\varepsilon - \varepsilon_4) + b_4 \cdot (\varepsilon - \varepsilon_4)^{m_4}$;

участок 5–6: $\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_5 + b_5 \cdot (\varepsilon - \varepsilon_5)^{m_5}$,

где E_b — начальный модуль упругости бетона;

b_2, m_2, b_3, m_3, b_4, m_4, b_5, m_5 — коэффициенты сплайна.

Начальный модуль упругости бетона определяется по формуле

$$E_b = \frac{\sigma_4 - \sigma_3}{\varepsilon_4 - \varepsilon_3}.$$

Для ниспадающих участков (1–2, 5–6) примем $m_2 = 2$, $m_5 = 2$, в этом случае:

$$b_2 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)^{m_2}} > 0,$$

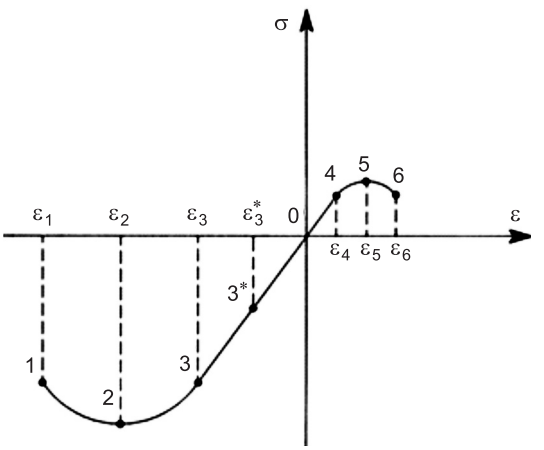
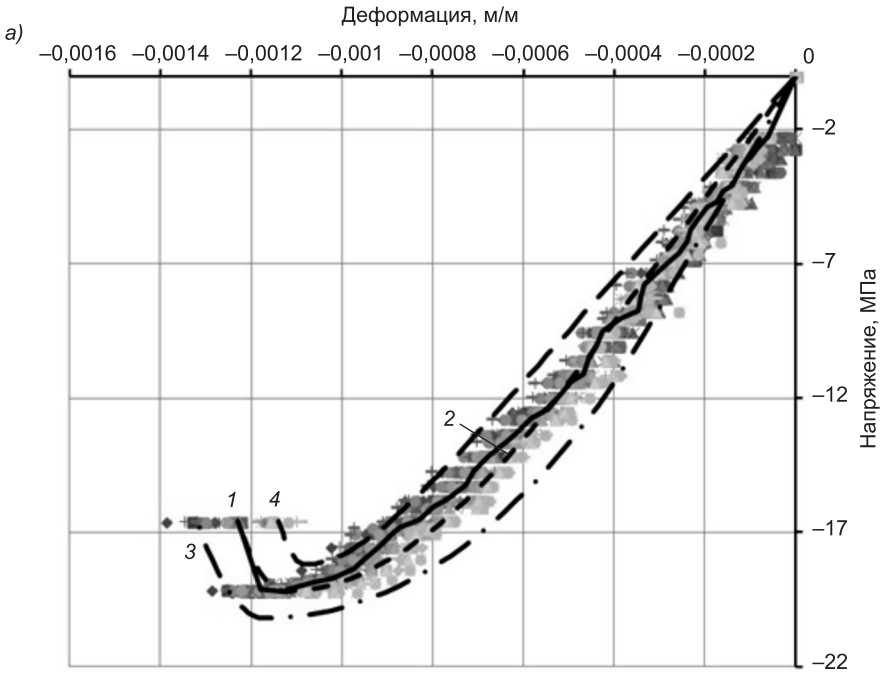
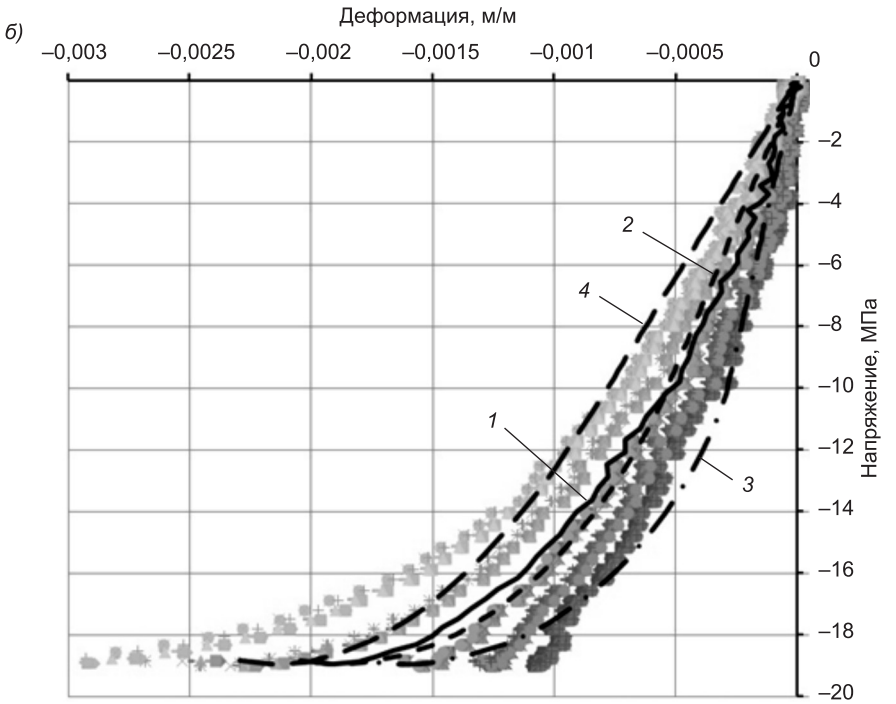


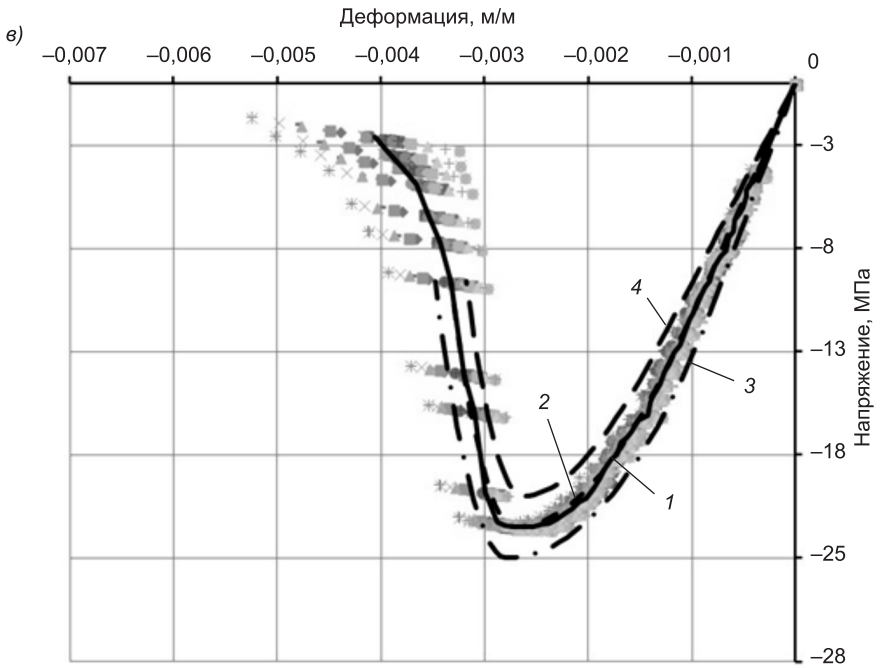
Рис. 10. Типичная диаграмма деформирования бетона





$$b_3 = \frac{\sigma_2 - E_b \cdot \varepsilon_2}{(\varepsilon_3 - \varepsilon_2)^{m_3}} > 0, \quad b_4 = \frac{\sigma_5 - E_{bt} \cdot \varepsilon_5}{(\varepsilon_5 - \varepsilon_4)^{m_4}} < 0, \quad b_5 = \frac{\sigma_6 - \sigma_5}{(\varepsilon_6 - \varepsilon_5)^{m_5}} < 0,$$

$$m_3 = \frac{E_{bc}}{\sigma_2 - E_{bc} \cdot \varepsilon_2} \cdot (\varepsilon_3 - \varepsilon_2) > 1, \quad m_4 = \frac{E_{bt}}{E_{bt} \cdot \varepsilon_5 - \sigma_5} \cdot (\varepsilon_5 - \varepsilon_4) > 1.$$



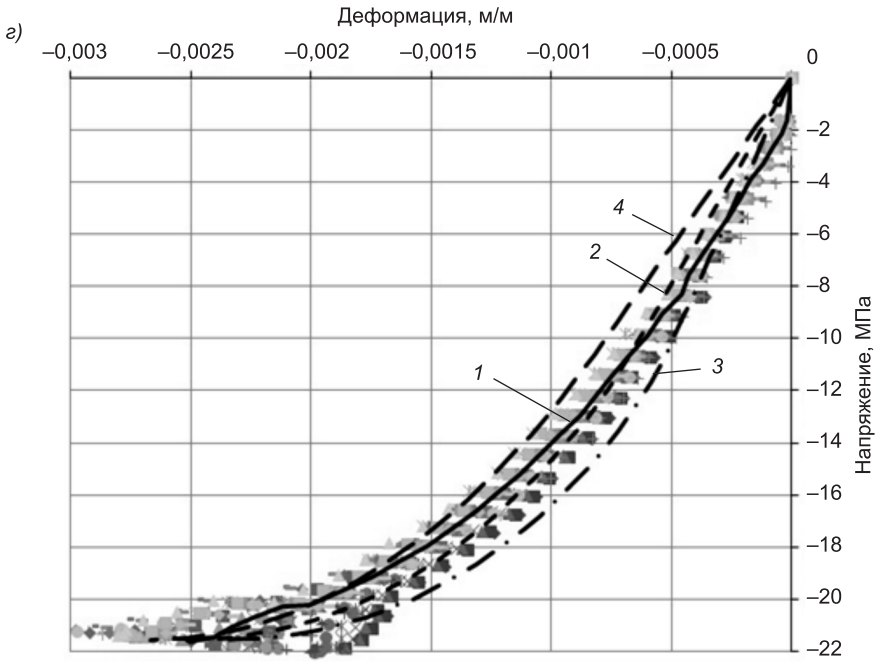


Рис. 11. «Облако» точек распределения зависимости σ–ε по сечениям бетонной призмы № 1 (*а*) и № 2 (*б*); железобетонной призмы № 1 (*в*) и № 2 (*г*) после исключения внецентренности

1 — экспериментальная осредненная кривая; *2* — осредненный сплайн; *3* — мажоранта; *4* — миноранта

Коэффициенты b_3, m_3, b_4, m_4 находятся из условий сопряжения сплайнов в узлах интерполяции (непрерывность сплайнов и их первых производных).

Нечеткая функция задается двумя кривыми, ограничивающими «облако» сверху и снизу: мажорантой и минорантой, а также осредненной кри-

Узлы аппроксимации для построения сплайна средней линии

№ узла	1	2	3
σ, МПа	16,57	19,19	10,03
ε, м/м	0,00124	0,001146	0,000457

вой. Для призм рассматривается участок диаграммы 1–0 (осевое сжатие). На примере бетонной призмы № 1 ниже приведены уравнения сплайнов.

Узлы для сплайн-функции, аппроксимирующей среднюю линию, определяются с помощью выделения [3, 9] прототипов кластеров (узлов аппроксимации) в «облаке» экспериментальных точек (см. таблицу).

Для средней линии аппроксимирующая сплайн-функция принимает вид:
участок 1 – 2:

$$\sigma_b(\varepsilon) = -19{,}19 + 2{,}89 \cdot 10^8 \cdot (-0{,}001146 - \varepsilon)^2; \quad (1)$$

участок 2 – 3:

$$\sigma_b(\varepsilon) = -10{,}03 + 21949{,}54 \cdot (\varepsilon - (-0{,}000457)) + \\ + 6{,}38 \cdot 10^8 \cdot (-0{,}000457 - \varepsilon)^{2{,}54}; \quad (2)$$

участок 3 – 4:

$$\sigma_b(\varepsilon) = 21949{,}54 \cdot \varepsilon. \quad (3)$$

Узлы для аппроксимирующей сплайн-функции миноранты определяются с помощью выделения [3, 9] прототипов кластеров (узлов аппроксимации) в «облаке» экспериментальных точек, лежащих выше средней линии (рис. 11): σ_1 = 16,57 МПа, ε_1 = 0,001151, σ_2 = 18,19 МПа, ε_2 = 0,001101, σ_3 = 10,03 МПа, ε_3 = 0,000547.

Аппроксимирующая сплайн-функция для миноранты принимает вид:
участок 1 – 2:

$$\sigma_b(\varepsilon) = -18{,}19 + 6{,}45 \cdot 10^8 \cdot (-0{,}001101 - \varepsilon)^2; \quad (4)$$

участок 2 – 3:

$$\sigma_b(\varepsilon) = -10{,}03 + 18340{,}25 \cdot (\varepsilon - (-0{,}000547)) + \\ + 3{,}7 \cdot 10^8 \cdot (-0{,}000547 - \varepsilon)^{2{,}54}; \quad (5)$$

участок 3 – 4:

$$\sigma_b(\varepsilon) = 18340{,}25 \cdot \varepsilon. \quad (6)$$

Узлы для аппроксимирующей сплайн-функции мажоранты определяются с помощью выделения [3, 9] прототипов кластеров (узлов аппроксимации) в «облаке» экспериментальных точек, лежащих ниже средней линии (см. рис. 11): σ_1 = 16,57 МПа, ε_1 = 0,001331, σ_2 = 20,19 МПа, ε_2 = 0,001191, σ_3 = 10,03 МПа, ε_3 = 0,000367.

Аппроксимирующая сплайн-функция для мажоранты принимает вид:
участок 1 – 2:

$$\sigma_b(\varepsilon) = -20{,}19 + 1{,}84 \cdot 10^8 \cdot (-0{,}001191 - \varepsilon)^2; \quad (7)$$

участок 2 – 3:

$$\sigma_b(\varepsilon) = -10{,}03 + 27327{,}49 \cdot (\varepsilon - (-0{,}000367)) + \\ + 8{,}4 \cdot 10^8 \cdot (-0{,}000367 - \varepsilon)^{2{,}54}; \quad (8)$$

участок 3 – 4:

$$\sigma_b(\varepsilon) = 27327{,}49 \cdot \varepsilon. \quad (9)$$

Узловые значения для аппроксимации средней линии можно определить непосредственно по значениям деформаций и напряжений, полученных для среднего сечения образца после исключения внецентренности: σ_1 = 16,57 МПа, ε_1 = 0,001229, σ_2 = 19,19 МПа, ε_2 = 0,001127, σ_3 = 10,03 МПа, ε_3 = 0,000439.

Тогда для средней линии аппроксимирующая сплайн-функция принимает вид:

участок 1 – 2:

$$\sigma_b(\varepsilon) = -19{,}19 + 2{,}51 \cdot 10^8 \cdot (-0{,}001127 - \varepsilon)^2; \quad (10)$$

участок 2 – 3:

$$\sigma_b(\varepsilon) = -10{,}03 + 22860{,}95 \cdot (\varepsilon - (-0{,}000439)) + \\ + 2{,}46 \cdot 10^8 \cdot (-0{,}000439 - \varepsilon)^{2{,}39}; \quad (11)$$

участок 3 – 4:

$$\sigma_b(\varepsilon) = 22860{,}95 \cdot \varepsilon. \quad (12)$$

Кривые, построенные для сплайна (1)–(3) и сплайна (10)–(12), практически сливаются. Это совпадение позволяет утверждать, что способ исключения внецентренности, предложенный в данной работе, дает возможность строить диаграммы сжатия бетона по экспериментальным данным, полученным в результате испытаний на одноосное сжатие с применением системы оптического измерения поверхностных деформаций Correlated Solutions Vic 3D.

На рис. 11, *а–г* графически представлены результаты обработки экспериментальных данных. Построены «облака» экспериментальных точек на координатной плоскости $\sigma - \varepsilon$. Нечеткие аппроксимации соответствуют двум кривым (мажоранта и миноранта), ограничивающим «облако» снизу и сверху.

Заключение. На основании экспериментальных исследований процессов деформирования бетонных и железобетонных призм при различных скоростях нагружения с использованием оптической системы Correlated Solutions Vic 3D предложен способ интерпретации экспериментальных данных и построения нечетких аппроксимаций диаграмм деформирования бетона, а также способ исключения внецентренности, позволяющий строить диаграммы сжатия бетона по экспериментальным данным, полученным в результате испытаний на одноосное сжатие с применением системы оптического измерения поверхностных деформаций Correlated Solutions Vic 3D.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона [Текст] / И.Н. Ахвердов. — М. : Стройиздат, 1981. — 464 с.
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. 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.
4. Zadeh, L.A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility [Текст] / L.A. Zadeh // Fuzzy sets and systems. — 1978. — N 1. — P. 3–28.

5. Zadeh, L.A. Similarity relations and fuzzy orderings [Текст] / L.A. Zadeh // Information Sciences. — 1971. — Vol. 3. — P. 177–200.
6. Zimmerman, H.J. Fuzzy set [Текст] / H.J. Zimmerman // Theory and its applications. — Second revised Edition. — 1990. — P. 398.
7. McCormick, N. Digital image correlation for structural measurements [Текст] / N. McCormick, Jerry Lord // New Civil Engineer. International Edition. — 2013. — N 5. — P. 26–31.
8. Жернаков, В.С. Влияние напряженно-деформированного состояния на циклическую трещиностойкость заклепочных соединений [Текст] / В.С. Жернаков, А.Н. Ермоленко, Р.М. Сабиров // Вестник УГАТУ. — 2011. — № 4 (44). — С. 67–72.
9. Штовба, С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB [Текст] / С.Д. Штовба. — М. : Горячая линия — Телеком, 2007. — 288 с.

АДИЩЕВ Владимир Васильевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: adishch@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
КАРПОВ Евгений Викторович, д-р физ.-мат. наук; E-mail: evkarpov@mail.ru
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
ДЕМЕШКИН Александр Григорьевич, канд. физ.-мат. наук
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
КАРПИЦКАЯ Юлия Равилевна, ст. препод.; E-mail: forget-me-not@ngs.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
МАЛЬЦЕВ Виктор Васильевич, асп.; E-mail: malcevviktor91@yandex.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
ИВАНОВ Андрей Игоревич, студ.; E-mail: ai722@yandex.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 30.07.15

Adishchev Vladimir Vasil'evich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: adishch@mail.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Karpov Evgenij Viktorovich, doctor of physical and mathematical sciences; E-mail: evkarpov@mail.ru, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia
Demeshkin Alexander Grigor'evich, candidate of physical and mathematical sciences, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russia
Karpitskaya Yuliya Ravilevna, senior lecturer; E-mail: forget-me-not@ngs.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Maltsev Viktor Vasil'evich, post-graduate student; E-mail: malcevviktor91@yandex.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Ivanov Andrey Igorevich, student; E-mail: ai722@yandex.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

USE OF OPTICAL SYSTEM OF CORRELATED SOLUTIONS VIC 3D FOR CREATION OF DIAGRAMS OF DEFORMATION OF CONCRETE

The method of interpretation of experimental data and creation of indistinct approximations of charts of deformation of concrete is offered. For the experiments we used a system of optical measurement of surface deformation Vic 3D. Due to the structural heterogeneity and unavoidable eccentricity of load application is difficult to interpret the deformation field and directly to construct diagrams of deformation. Becomes the evident the need to present strain diagrams in the form of fuzzy functions. Use the spline function approximation algorithm for curve fitting. Interpolation points are selected using cluster analysis. This work was supported by grant RFFI N 13-08-00633.

Key words: deformation diagram, fuzzy function, concrete, Correlated Solutions Vic 3D.

REFERENCES

1. Akhverdov, I.N. Basics of physics concrete [Text] / I.N. Akhverdov. — M. : Stroyizdat, 1981. — 464 p.
2. Adishchev, V.V. Determination of reference charts transformation ratio for bend and eccentrically compressed reinforsed 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. Aplication of cluster analysis for construction of fuzzy appoximations 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.
4. Zadeh, L.A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility [Text] / L.A. Zadeh // Fuzzy sets and systems. — 1978. — N 1. — P. 3–28.
5. Zadeh, L.A. Similarity relations and fuzzy orderings [Text] / L.A. Zadeh // Information Sciences. — 1971. — Vol. 3. — P. 177–200.
6. Zimmerman, H.J. Fuzzy set [Text] / H.J. Zimmerman // Theory and its applications. — Second revised Edition. — 1990. — P. 398.
7. McCormick, N. Digital image correlation for structural measurements [Text] / N. McCormick, Jerry Lord // New Civil Engineer. International Edition. — 2013. — N 5. — P. 26–31.
8. Zhernakov, V.S. Effect of stress-strain state in the cyclic crack of rivet joints [Text] / V.S. Zhernakov, A.N. Ermolenko, R.M. Sabirov // Vestnik UGATU. — 2011. — N 4 (44). — P. 67–72.
9. Shtovba, S.D. Design of the fuzzy systems using MATLAB tools [Text] / S.D. Shtovba. — M. : Goryachaya liniya — Telekom, 2007. — 288 p.

УДК 532.14 : 536.1

В.И. БУКРЕЕВ, В.В. ДЕГТЯРЕВ, А.В. ЧЕБОТНИКОВ

ВЛИЯНИЕ НЕМОНОТОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ДВИЖЕНИЕ СОЛЕНОЙ ВОДЫ*

Выполнено экспериментальное исследование движения водного раствора соли NaCl в условиях, когда в начальном состоянии плотность постоянна во всем объеме, занятом раствором, а температура и соленость изменяются в горизонтальном направлении скачками. Показано, что такое начальное состояние некоторое время неустойчиво и имеет место хаотическое макроскопическое движение. Через 1,2–1,8 ч макроскопическое движение прекратилось вследствие влияния вязкости раствора и сохранилось только микроскопическое движение, обусловленное молекулярной диффузией растворенной соли. К этому времени в жидкости установилось промежуточное макроскопически устойчивое неравномерное по глубине распределение плотности. Это промежуточное распределение очень медленно, в течение двух недель, перешло в окончательное равномерное распределение. Продемонстрировано влияние на эти процессы немонотонной зависимости плотности раствора от температуры.

Ключевые слова: плотность раствора, немонотонная зависимость плотности воды от температуры, уплотнение при смешении, диффузия.

Немонотонный характер зависимости плотности от температуры является уникальным термодинамическим свойством воды. При атмосферном давлении плотность пресной воды максимальна при температуре 3,98 °С. В соленой воде максимум смещается с ростом солености в сторону более низкой температуры и его относительная величина уменьшается. В морской воде при солености, превышающей примерно 24 ‰, зависимость плотности от температуры становится монотонной.

Определяющее значение для климата и экологии Земли имеет также эффект увеличения плотности при смешении масс воды с различной температурой и соленостью. Этот эффект характеризуется терминами «уплотнение при смешении» или «каббелинг». Он проявляется и в пресной, и в соленой воде.

Впервые систематическое исследование эффектов, обусловленных нелинейной зависимостью плотности соленой воды от температуры, выполнил Е. Витте [1]. Из числа дальнейших публикаций отметим [2]. В пресной воде эффект уплотнения при смешении впервые систематически исследовал Ф.А. Форел [3]. Из дальнейших публикаций отметим [4].

В данной работе приведены некоторые результаты лабораторных опытов с соленой водой по методике, детально изложенной в [5]. Принципиальная особенность этих опытов состоит в том, что в начальном состоянии плотность имеет постоянное значение во всем объеме, занятом жидкостью, а температура и соленость изменяются только в продольном направлении, причем со скачками в середине экспериментальной установки (в начале системы координат). Такое необычное начальное состояние можно реализо-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционного проекта СО РАН (проект № 38).

© Букреев В.И., Дегтярев В.В., Чеботников А.В., 2015

вать благодаря нелинейной зависимости плотности воды от температуры. Во всех других ранее выполненных многочисленных опытах плотность в начальном состоянии также изменялась в горизонтальном направлении скачком. Рассматриваемое здесь начальное состояние позволяет в наиболее простых условиях изучать влияние немонотонной зависимости плотности воды от температуры.

Опыты выполнялись в прямоугольном лотке из оргстекла длиной 2 м и шириной 6 см. Лоток разделялся на две равные части вертикальной перегородкой и заполнялся водными растворами поваренной соли с разной температурой T и разной соленостью S в каждой половине при соблюдении условия равенства начальных значений плотности слева и справа от перегородки. Плотность раствора при атмосферном давлении зависит от температуры и концентрации растворенной соли. Ниже приводятся результаты двух опытов. В обоих опытах начальная плотность раствора была одинаковой и равной $\rho_0 = 1007{,}47$ кг/м^3. С целью снижения погрешности измерений в опытах задавалась относительно небольшая соленость, характерная, например, для Азовского моря и Амурского лимана Охотского моря.

В опыте, которому далее присвоен номер 1, начальные температуры T_1 в левой части лотка и T_2 в правой части были больше температуры, при которой раствор имел максимальную плотность. В этом опыте влияние немонотонной зависимости плотности от температуры не проявлялось. Условия проведения этого опыта для краткости называются далее обычными условиями. Влияние немонотонной зависимости плотности от температуры проявилось в опыте, которому присвоен номер 2. В нем начальная температура T_1 слева от перегородки была меньше температуры максимальной плотности раствора. Это условие называется далее аномальным. В правой половине лотка начальная температура в этом опыте также была больше температуры максимальной плотности. Начальные значения соленостей в левой S_1 и в правой S_2 частях лотка в рассматриваемых примерах не варьировались. Опыт начинался с того, что перегородка осторожно удалялась вертикально вверх за 3–4 с. Опыты показали, что после удаления перегородки начиналось движение раствора. Это движение было неустойчивым.

После удаления перегородки в жидкости протекало три процесса: макроскопическое движение раствора со скоростями порядка 1 см/с, молекулярный перенос тепла и молекулярная диффузия растворенной соли. Продолжительности этих процессов существенно различаются. Быстрее всего прекращается из-за трения макроскопическое движение. В обычных условиях макроскопическое движение сохранялось около 1,2 ч. В аномальных условиях макроскопическое движение продолжалось в полтора раза дольше. Молекулярный перенос тепла прекратился через 12 ч как в обычных, так и в аномальных условиях. Коэффициент молекулярной диффузии поваренной соли в воде равнялся $1{,}4 \cdot 10^{-5}$ см^2/с. Это значение почти на три порядка меньше коэффициента кинематической вязкости. При таком малом значении коэффициента молекулярной диффузии растворенной соли выравнивание плотности по всей глубине воды в лотке, равной 10 см, произошло только за две недели.

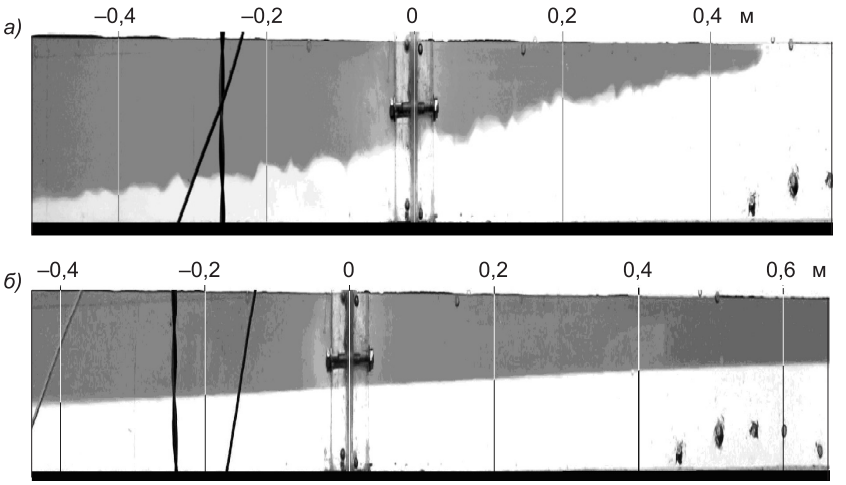


Рис. 1. Распределение окрашенного и неокрашенного растворов в нормальных условиях

T_1 = 3,9 °C, T_2 = 19,4 °C, S_1 = 10 ‰, S_2 = 12,86 ‰; *а* — t = 136 с; *б* — t = 1000 с

Картины неустойчивого движения в обычных и аномальных условиях сильно различались. Соответствующие фотоснимки, полученные в обычных условиях, приведены на рис. 1, в аномальных условиях — на рис. 2. Раствор в левой половине лотка окрашивался небольшим количеством чернил. Связанное с этим незначительное увеличение плотности компенсировалось добавлением в правую часть соответствующего по весу количества поваренной соли. Иллюстрации приведены для двух моментов времени, одинаковых для обоих опытов. Вертикальный масштаб снимков увеличен в 2,5 раза по сравнению с горизонтальным масштабом.

В обычных условиях (см. рис. 1) часть окрашенного раствора перетекала из левой части в правую вдоль свободной поверхности. Это порождало встречное сдвиговое течение вдоль дна и горизонтальное расслоение окра-

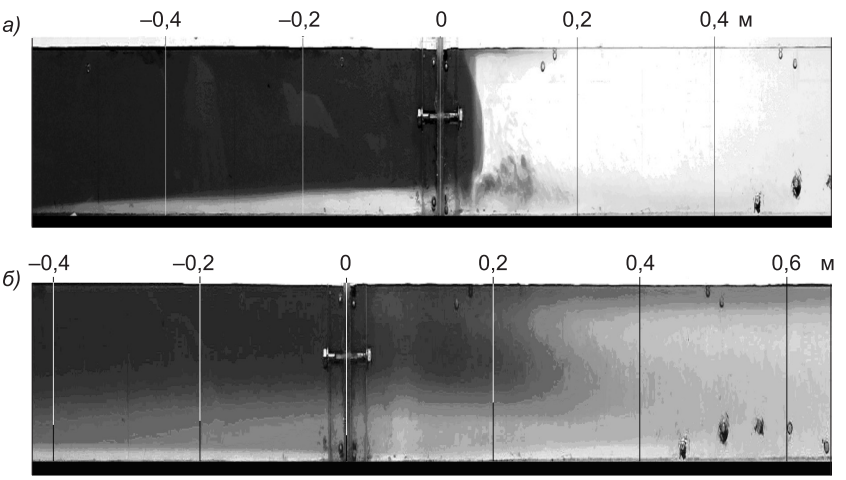


Рис. 2. Распределение окрашенного и неокрашенного растворов в аномальных условиях

T_1 = 0,8 °C, T_2 = 19,4 °C, S_1 = 10 ‰, S_2 = 12,86 ‰; *а* — t = 136 с; *б* — t = 1000 с

шенного и неокрашенного растворов. Некоторое время сдвиговое течение порождало неустойчивость границы раздела между слоями (см. рис. 1, *а*). В обычных условиях такая неустойчивость существовала только в течение 10 мин. Затем движение раствора стало устойчивым во всем лотке (см. рис. 1, *б*).

В аномальных условиях немонотонная зависимость плотности раствора от температуры некоторое время противодействовала вертикальному расслоению окрашенного и неокрашенного растворов, и хаотическое движение раствора имело место только в относительно тонком вертикальном слое в окрестности начала координат (см. рис. 2, *а*). В аномальных условиях хаотическое движение продолжалось в полтора раза дольше, чем в обычных условиях. В частности, картина распределения окрашенного и неокрашенного растворов на рис. 2, *б* получена, когда хаотический характер движения еще сохранился.

На рис. 3 z^0 — вертикальная координата, нормированная на глубину раствора; S^0 — соленость, нормированная на среднюю соленость $S_0 = (S_1 + S_2)/2 = 11{,}43$ ‰. Здесь приведены распределения солености по вертикальной координате в три момента времени t от начала опыта. Эти данные получены в обычных условиях. Распределения плотности по глубине в те же моменты времени приведены на рис. 4. Плотность нормирована на плотность в начальном состоянии ρ_0. В момент времени, которому соответствуют графики на рис. 3, 4, макроскопическое движение уже прекратилось.

Аномальная зависимость плотности раствора от температуры влияла только на начальном интервале времени в течение 1,8 ч, когда еще продолжалось макроскопическое движение растворов. После этого макроскопическое движение прекратилось во всем лотке, и дальнейшее изменение плотности происходило только за счет молекулярной диффузии растворенной соли. Этот процесс очень медленный. Окончательное устойчивое равномерное по всему объему раствора распределение плотности установилось только через две недели.

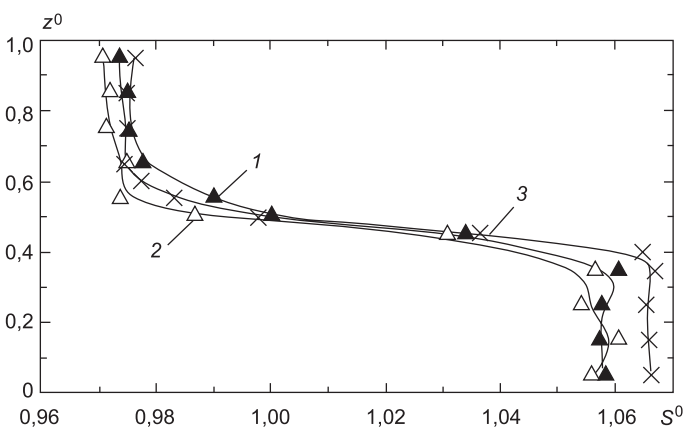


Рис. 3. Распределение солености по глубине при $x^0 = x/h = -1{,}5$
$T_1 = 3{,}9$ °C, $T_2 = 19{,}4$ °C, $S_1 = 10$ ‰, $S_2 = 12{,}86$ ‰; $\rho_0 = 1007{,}47$ кг/м^3, $h = 0{,}1$ м;
1 — $t = 2770$ с, *2* — $t = 3500$ с, *3* — $t = 4500$ с

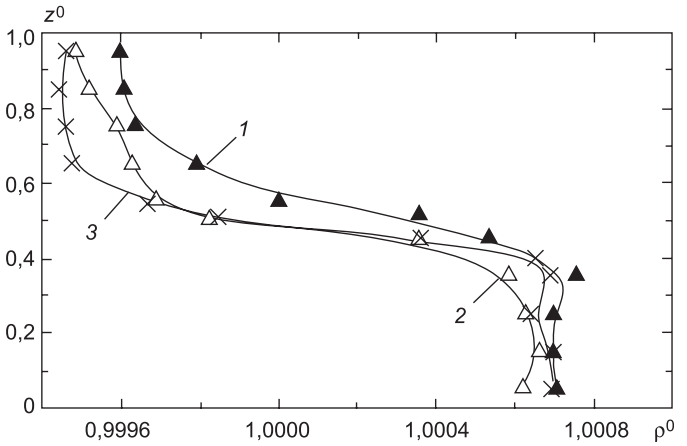


Рис. 4. Распределение плотности ρ по глубине
$x^0 = x/h = -1{,}5$; $\rho^0 = \rho/\rho_0$; $T_1 = 3{,}9$ °C, $T_2 = 19{,}4$ °C, $S_1 = 10$ ‰, $S_2 = 12{,}86$ ‰;
$\rho_0 = 1007{,}47$ кг/м^3, $h = 0{,}1$ м;
1 — $t = 2770$ с, *2* — $t = 3500$ с, *3* — $t = 4500$ с

В обычных условиях продолжительность интервала времени, на котором сохранялось макроскопическое движение, было меньше, чем в аномальных условиях. Это обусловлено существенным различием характера движения раствора в обычных и аномальных условиях (см. рис. 1, 2). В обычных условиях часть раствора из левой половины лотка распространялась в правую половину вдоль свободной поверхности сразу после удаления перегородки. В левой половине лотка имело место перетекание части раствора из правой половины вдоль дна. В аномальных условиях такому обмену растворами между левой и правой половинами лотка некоторое время препятствовала немонотонность зависимости плотности от температуры. Этим обусловлено увеличение времени существования макроскопического движения в аномальных условиях.

В заключение можно отметить, что неустойчивость течения существенно затрудняет теоретический анализ рассматриваемого течения, особенно в аномальных условиях, когда в ходе процесса изменяется знак одного из слагаемых уравнений движения (знак силы плавучести). Поэтому соответствующая информация может быть получена пока только в эксперименте.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Witte, E. Zur Theorie der Stromkabbelungen [Текст] / E. Witte // Gaea. — 1903. — Vol. 39. — P. 229–230.
2. Федоров, К.Н. Физическая природа и структура океанических фронтов [Текст] / К.Н. Федоров. — Л. : Гидрометеоиздат, 1983. — 296 с.
3. Forel, F.A. Le Léman, Monographie limnologique [Текст] / F.A. Forel. — Lausanne: Librairie de l‘Université. — 1904. — Vol. 3. — 744 p.
4. Тихомиров, А.И. Термика крупных озер [Текст] / А.И. Тихомиров — Л. : Наука, 1983. — 232 с.
5. Букреев, В.И. Лабораторное исследование влияния эффекта уплотнения при смешении на струйные течения [Текст] / В.И. Букреев // Океанология. — 2013. — Т. 53. — С. 121–129.

БУКРЕЕВ Виктор Иванович, д-р физ.-мат. наук, проф.; E-mail: bukreev@hydro.nsc.ru
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН
ДЕГТЯРЕВ Владимир Владимирович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: gts@sibstrin.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
ЧЕБОТНИКОВ Алексей Владимирович, канд. техн. наук; E-mail: avchebotnikov@gmail.com
Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН

Получено 07.07.15

Bukreev Viktor Ivanovich, doctor of physical and mathematical sciences, professor; E-mail: bukreev@hydro.nsc.ru, Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Russia
Degtyarev Vladimir Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: gts@sibstrin.ru, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia
Chebotnikov Alexey Vladimirovich, candidate of technical sciences; E-mail: avchebotnikov@gmail.com; Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Russia

EFFECT OF NON-MONOTONIC DEPENDENCE OF THE DENSITY ON THE TEMPERATURE ON THE MOVEMENT OF SALT WATER

An experimental study of the motion of an aqueous solution of NaCl under conditions where the initial state density is constant throughout the volume occupied by the solution, but the temperature and salinity changes in the horizontal direction by jumps. It is shown that initial state is unstable for some time, and there is a chaotic macroscopic motion. After 1,2–1,8 hours macroscopic motion has stopped due to the influence of the viscosity of the solution, and only the microscopic motion caused by molecular diffusion of dissolved salt kept. To this time, an intermediate stable inhomogeneous distribution of density in depth established in liquid. This intermediate distribution is transformed into the final uniform distribution very slow, for two weeks. The influence is demonstrated of non-monotonic dependence of the density of the solution temperature on these processes.

Key words: density of the solution, non-monotonic dependence of the water density on temperature, cabbeling, diffusion.

REFERENCES

1. Witte, E. Zur Theorie der Stromkabbelungen [Text] / E. Witte // Gaea. — 1903. — Vol. 39. — P. 229–230.
2. Fedorov, K.N. The physical pature and structure of oceanic fronts [Text] / K.N. Fedorov. — L. : Gidrometeoizdat, 1983. — 296 p.
3. Forel, F.A. Le Léman, Monographie limnologique [Text] / F.A. Forel. — Lausanne: Librairie de l'Université. — 1904. — Vol. 3. — 744 p.
4. Tikhomirov, A.I. Thermal regime of large lakes [Text] / A.I. Tikhomirov. — L. : Nauka, 1983. — 232 p.
5. Bukreev, V.I. Laboratory study of the influence of the densification during mixing effect on jet flows [Text] / V.I. Bukreev // Oceanology. — 2013. — Vol. 53, N 1. — P. 110–118.

УДК 532. 517

Л.И. ВЫСОЦКИЙ

ЗАМЕЧАНИЯ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ

Рассмотрены некоторые проблемы определения эквивалентной относительной шероховатости, на которые в настоящее время не обращается внимания, что может приводить к серьезным последствиям. Для исключения таких последствий предлагается ввести в ГОСТ соответствующие директивные требования.

Ключевые слова: эквивалентная относительная шероховатость, коэффициент Дарси, погрешность, формула Кольбрука, формула Прандтля.

Одной из важных задач гидравлического расчета трубопроводных систем является определение потерь на трение по длине, которые вычисляются с помощью формулы Дарси:

$$h_l = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}, \tag{1}$$

где h_l — потери по длине;
l и d — длина и диаметр трубопровода;
V — средняя скорость;
λ — коэффициент Дарси.

Известно, что коэффициент Дарси при турбулентном движении определяется числом Рейнольдса и эквивалентной относительной шероховатостью

$$\lambda = \lambda(\mathrm{Re}_d; \Delta_э/r), \tag{2}$$

где $\mathrm{Re}_d = V d / \nu$ — число Рейнольдса;
ν — кинематический коэффициент вязкости;
$\Delta_э$ — высота выступов эквивалентной шероховатости.

Наиболее надежной для определения коэффициента Дарси в мировом сообществе признана универсальная формула Кольбрука [1], справедливая для всей доквадратичной зоны сопротивления:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left(\frac{2{,}51}{\mathrm{Re}_d\sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta_э}{7{,}4r}\right). \tag{3}$$

Здесь r — радиус трубы.

Успех применения формулы Кольбрука полностью зависит от надежности определения значения эквивалентной шероховатости. Возможность сопоставления результатов, рекомендуемых различными исследователями для расчета течений в трубах и каналах с естественной или неравнозернистой шероховатостью, требует приведения их к неким стандартным условиям. По-видимому, можно признать, что до сего времени

© Высоцкий Л.И., 2015

не существует даже твердо согласованного понятия об эквивалентной шероховатости. Приведем несколько ее определений.

В [2] «вводится понятие об эквивалентной шероховатости $\Delta_э$, т.е. такой равномерной шероховатости, которая дает при подсчете одинаковую с заданной шероховатостью величину λ».

Вероятно, здесь допущена описка и вместо «равномерной» следует читать «равнозернистой».

У Д.В. Штеренлихта [3] находим: «под эквивалентной шероховатостью понимают высоту выступов равнозернистой шероховатости из однородного песка, при которой в квадратичной области сопротивления получается такое же значение λ, что и в рассматриваемой трубе».

А.Д. Альтшуль [4] считает, что «под эквивалентной равномерно-зернистой шероховатостью $\Delta_э$ понимают такую высоту выступа песка Никурадзе, которая создает сопротивление, равное действительному сопротивлению испытываемого трубопровода».

С.В. Избаш [5] утверждает, что эквивалентная зернистой шероховатость «представляет собой такой выступ $\Delta_э$ зернистой шероховатости, который дает одинаковые с “практической поверхностью” значения коэффициента λ для того же линейного размера живого сечения».

Г. Шлихтинг [6] полагает, что формула Л. Прандтля для квадратичной зоны сопротивления «позволяет для любой шероховатости вычислить эквивалентную песочную шероховатость, под которой мы будем понимать тот размер зерен песка, который при применении формулы Л. Прандтля дает такой же коэффициент сопротивления, как и фактическая шероховатость».

С. Гольдштейн [7] трактует определение Шлихтинга таким образом: «он вводил длину $\Delta_э$, называемую “эквивалентной песочной шероховатостью”, которая определяется как линейный размер, при котором однородная шероховатость, создаваемая зернами песка этого размера — типа, применявшегося Никурадзе в его экспериментах с трубами, создает такое же сопротивление, какое обнаруживается в действительности». Если $\Delta_э$ известно для какого-нибудь типа шероховатости, то можно применять выведенные выше формулы и расчеты для шероховатых труб, каналов и пластинок, заменяя Δ на $\Delta_э$. То есть здесь подчеркивается наличие квадратичного сопротивления.

П.Г. Киселев [8] дает соответствующую формулировку в виде: «под эквивалентной равномерно-зернистой шероховатостью понимают такую высоту выступов шероховатости, сложенной из песчинок одинакового размера, которая дает при подсчете одинаковую с заданной шероховатостью величину λ».

Р.Р. Чугаев [9] о том же говорит так: «Рассматривают квадратичную область сопротивления и для этой области опытным путем, пользуясь формулой Дарси, находят для длинной трубы величину λ. Затем по формуле Л. Прандтля вычисляют искомое значение $\Delta_э$. Найденное таким образом среднее значение $\Delta_э$ называют эквивалентной шероховатостью».

Ф.А. Шевелев [10] поясняет: «величина эквивалентной абсолютной шероховатости $\Delta_э$ находится, исходя из определенного опытным путем значения $\lambda_{кв}$, причем для этого пользуются обычно формулой Л. Прандтля». Он же относительно формулы Л. Прандтля полагает, что «она может иметь

лишь ограниченную область применения» и что она «видимо, имеет определенные органические недостатки».

Ф.А. Шевелевым предлагается, по сути, ревизия формулы Л. Прандтля, а не принятие ее за эталон. По его мнению, «следует отметить, что коэффициент при d в формуле Прандтля — Никурадзе, равный 3,7, весьма завышен, поскольку, как указывалось ранее, гидродинамическая действенная высота элементов шероховатости в опытах Никурадзе фактически была в несколько раз меньше условного размера зерен песка» (?).

Под термином «эквивалентная шероховатость» А.П. Зегжда [11] понимал «некоторую фиктивную высоту бугорка шероховатости $\Delta_э$, подстановка которой в формулу И. Никурадзе [12] дает величину коэффициента сопротивления, равную суммарному коэффициенту шероховатой поверхности». В этом определении содержится не очень ясный термин — суммарный коэффициент шероховатой поверхности. Можно догадываться, что здесь речь идет об экспериментальном значении λ.

Ф.А. Шевелев прямо указывает, что «величина эквивалентной абсолютной шероховатости $\Delta_э$ находится, исходя из определенного опытным путем значения $\lambda_{кв}$, причем для этого пользуются обычно квадратичной формулой Прандтля».

В учебнике А.Д. Гиргидова [13] указывается, что при определении эквивалентной шероховатости значения λ должны быть одинаковыми в обеих трубах, т.е. в трубах с равнозернистой и естественной шероховатостью, что неточно.

Входя с собой в противоречие, Р.Р. Чугаев в «Гидравлических терминах» дает другое определение: шероховатость относительная эквивалентная — «воображаемая равномерно распределенная (по поверхности стенок) относительная шероховатость, выступы которой имеют одинаковую форму и размеры. Величина $\Delta_э$ подбирается (для данного русла) таким образом, чтобы *потеря по длине*, получающаяся при этой шероховатости, оказалась равной потере напора по длине при действительной (неравномерной) шероховатости. Эквивалентную величину $\Delta_э$ вычисляют по имеющимся формулам, дающим связь между $\Delta_э$ и величиной потерь напора по длине. При этом рассматривают квадратичную область сопротивления; причем величину потерь напора по длине определяют для рассматриваемого русла экспериментальным путем». Оставляя вне рассмотрения предложение Р.Р. Чугаева перейти на шероховатость с выступами одинаковой формы и размеров, что равнозначно призыву принять не никурадзеву, а некую иную шероховатость, обратим внимание на главное в этой формулировке: в ней требуется, в конечном счете, не равенство коэффициентов гидравлического трения, т.е. $\lambda_{кв} = (\lambda_{кв})_э$, а равенство потерь по длине $h_\ell = (h_\ell)_э$. В [14] показано, что это далеко не одно и то же.

Существует множество иных определений. Среди них имеются и достаточно вычурные, обставленные множеством «если». На них не останавливаемся.

Таким образом, можно выделить три основных мнения, которые закладываются в понятие об эквивалентной шероховатости:

— *требование получения для нее значения коэффициента Дарси, равного его же значению при песочной (никурадзевой) шероховатости при квадратичном сопротивлении;*

— требование равенства потерь на трение данной трубы и трубы с песочной шероховатостью;

— требование равенства коэффициентов Дарси для реальной и никурадзевой труб одинакового диаметра без обязательной привязки к квадратичной зоне сопротивления.

Можно отметить также серьезное единодушие в определении физического смысла понятия эквивалентной шероховатости, заключающегося в достижении условия $\lambda_{кв} = (\lambda_{кв})_N$.

Важность рассматриваемой проблемы подчеркивалась неоднократно.

За стандарт для определения эквивалентной относительной шероховатости практически во всем мире принята формула Л. Прандтля:

$$\left(\lambda_{кв}\right)_N = \frac{0,25}{\left(\lg\frac{3,7d_N}{\Delta_N}\right)^2}, \qquad (4)$$

базирующаяся на опытах И. Никурадзе с равнозернистой шероховатостью.

Это условие во многих случаях является крайне обременительным. Трудновыполнимые условия, обеспечение которых связано со значительными материальными затратами, возникают обычно при малых шероховатостях и больших диаметрах труб. По-видимому, это обстоятельство привело к появлению в ГОСТ 8.563.1–97 предписания об использовании при определении эквивалентной шероховатости формулы Кольбрука: «В.3.4. Для ИТ с естественной шероховатостью определяют эквивалентную шероховатость $R_ш$ через коэффициент гидравлического трения в ИТ λ и число Рейнольдса Re. Поскольку эквивалентная по формуле Кольбрука $\frac{R_ш}{D} = 3,71\cdot 10^{-1/(2\sqrt{\lambda})} - \frac{9,34}{\mathrm{Re}\sqrt{\lambda}}$ (В.32)», что в свете сказанного можно только приветствовать. Однако следует иметь в виду, что при использовании любой из подходящей для рассматриваемой цели формул приходится использовать некоторые опытные данные. Последние же получаются с определенной погрешностью. Поэтому следовало бы предварительно исследовать, как они скажутся на полученном результате и какими должны быть требования к их точности. Представляется, что с высокой точностью измеряются такие параметры, как диаметр трубы с неравнозернистой шероховатостью (весовым или объемным способом), объемный расход, средняя скорость и температура.

Поскольку эквивалентная шероховатость входит в формулу для коэффициента Дарси, сосредоточим внимание на ее реакции на возможные погрешности. Условимся, например, о том, что при использовании рекомендуемого значения эквивалентной относительной шероховатости погрешность должна составлять не более +5 % (в запас прочности). Исследуем для примера влияние точности определения эквивалентной шероховатости на значение коэффициента Дарси в случае использования формулы Прандтля для квадратичной зоны сопротивления (4). Исследование проведем наиболее наглядным способом с помощью вычислительного эксперимента. С этой целью зададимся неким «точным» значением $\Delta_э/r$ и вычислим по формуле (4) соответствующее ему значение λ. Затем

придадим последовательно значению $\Delta_э/r$ погрешность p и выясним, с какой погрешностью при этом определится λ. Зададим, например, значения p = 1,00; 1,01; 1,10; 1,20. Результаты сведем в табл. 1.

Таблица 1. **К оценке влияния погрешности в определении $\Delta_э/r$ на получаемую погрешность в коэффициенте Дарси при использовании формулы (4)**

$\Delta_э/r$		λ	%	$\Delta_э/r$		λ	%
$\Delta_э/r$	0,00005	0,00933	0,00	$\Delta_э/r$	0,0005	0,01434	0,00
1,01 $\Delta_э/r$	—	0,00931	–0,16	1,01 $\Delta_э/r$	—	0,01431	–0,19
1,05 $\Delta_э/r$	—	0,00925	–0,81	1,05 $\Delta_э/r$	—	0,01420	–0,99
1,10 $\Delta_э/r$	—	0,00918	–1,58	1,10 $\Delta_э/r$	—	0,01406	–1,94
1,20 $\Delta_э/r$	—	0,00905	–2,99	1,20 $\Delta_э/r$	—	0,01381	–3,67
$\Delta_э/r$	0,005	0,02482	0,00	$\Delta_э/r$	0,05	0,05300	0,00
1,01 $\Delta_э/r$	—	0,02475	–0,28	1,01 $\Delta_э/r$	—	0,05275	–0,40
1,05 $\Delta_э/r$	—	0,02449	–1,33	1,05 $\Delta_э/r$	—	0,05194	–1,93
1,10 $\Delta_э/r$	—	0,02418	–2,57	1,10 $\Delta_э/r$	—	0,05100	–3,71
1,20 $\Delta_э/r$	—	0,02362	–4,82	1,20 $\Delta_э/r$	—	0,04930	–6,92

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для определения коэффициента Дарси с погрешностью меньшей 5 % эквивалентную шероховатость необходимо вводить с погрешностью не большей 20 %. Этот результат, казалось бы, обнадеживает.

Выполним следующий вычислительный эксперимент для решения обратной задачи, а именно выясним, как погрешность экспериментального определения коэффициента Дарси сказывается на точности определения эквивалентной шероховатости с помощью формулы Прандтля. Используем ту же методику, а полученные результаты сведем в табл. 2.

Простейший анализ результатов (см. табл. 2), к сожалению, позволяет заключить, что для определения эквивалентной шероховатости рассматриваемым способом с погрешностью меньшей 20 % экспериментальное значение коэффициента Дарси необходимо определять с погрешностью не более 1 %.

Продолжим вычислительный эксперимент и распространим его на экономически гораздо более выгодный случай использования формулы Кольбрука при снятых ограничениях на необходимость проведения опытов по определению λ при квадратичном сопротивлении. Очевидно, что экономичность проведения требуемых опытов повышается при уменьшении значения числа Рейнольдса. По-видимому, за наименьшее его допустимое для указанной цели значение можно принять Re_d = 100 000. Это условие

Таблица 2. **К оценке влияния погрешности в определении λ на получаемую погрешность в $\Delta_э/r$ при использовании формулы (4)**

λ		$\Delta_э/r$	%	λ		$\Delta_э/r$	%
λ	0,009331	0,0000493	–1,34	λ	0,01434	0,000494	–1,17
1,01 λ	—	0,00005233	4,67	1,01 λ	—	0,000518	3,86
1,05 λ	—	0,00006574	31,48	1,05 λ	—	0,000623	24,6
λ	0,02482	0,00496	–0,79	λ	0,05300	0,0498	–0,37
1,01 λ	—	0,00514	2,87	1,01 λ	—	0,0511	2,14
1,05 λ	—	0,00592	18,31	1,05 λ	—	0,0592	12,39

примем за исходное. При желании заинтересованный читатель может продолжить этот эксперимент самостоятельно.

Используем ту же двойную схему изучения влияния $\Delta_э/r$ на λ и наоборот при тех же условиях. Полученные результаты приведем в табл. 3, 4 (они соответствуют значению $\mathrm{Re}_d = 100\,000$).

Таблица 3. **К оценке влияния погрешности в определении $\Delta_э/r$ на получаемую погрешность в коэффициенте Дарси при использовании формулы Кольбрука**

$\Delta_э/r$		λ	%	$\Delta_э/r$		λ	%
$\Delta_э/r$	0,00005	0,01808	0,00	$\Delta_э/r$	0,0005	0,01920	0,00
1,01 $\Delta_э/r$	—	0,01808	0,01	1,01 $\Delta_э/r$	—	0,01921	0,05
1,05 $\Delta_э/r$	—	0,01809	0,04	1,05 $\Delta_э/r$	—	0,01926	0,29
1,10 $\Delta_э/r$	—	0,01809	0,08	1,10 $\Delta_э/r$	—	0,01931	0,59
1,20 $\Delta_э/r$	—	0,01811	0,15	1,20 $\Delta_э/r$	—	0,01943	1,18
$\Delta_э/r$	0,005	0,02629	0,00	$\Delta_э/r$	0,05	0,05330	0,00
1,01 $\Delta_э/r$	—	0,02634	0,09	1,01 $\Delta_э/r$	—	0,05351	0,39
1,05 $\Delta_э/r$	—	0,02658	1,09	1,05 $\Delta_э/r$	—	0,05434	1,95
1,10 $\Delta_э/r$	—	0,02686	2,16	1,10 $\Delta_э/r$	—	0,05536	3,86
1,20 $\Delta_э/r$	—	0,02741	4,27	1,20 $\Delta_э/r$	—	0,05735	7,60

Таблица 4. **К оценке влияния погрешности в определении λ на получаемую погрешность в $\Delta_э/r$ при использовании формулы Кольбрука**

λ		$\Delta_э/r$	%	λ		$\Delta_э/r$	%
λ	0,01808	0,0000335	–32,6	λ	0,01920	0,000482	–3,49
1,01 λ	—	0,000102	103,5	1,01 λ	—	0,000566	13,19
1,05 λ	—	0,000391	682,0	1,05 λ	—	0,000919	83,80
λ	0,02629	0,00496	–0,86	λ	0,05330	0,0498	–0,56
1,01 λ	—	0,00518	3,63	1,01 λ	—	0,0510	1,98
1,05 λ	—	0,00618	22,47	1,05 λ	—	0,0562	12,40

Анализ табл. 3 позволяет заключить, что при расчете λ по формуле Кольбрука достаточно знать значение эквивалентной шероховатости с точностью до 20 %.

Неожиданный вывод получаем из рассмотрения данных табл. 4. Легко установить, что для значений эквивалентной шероховатости $\Delta_э/r < 0{,}005$ формулу Кольбрука использовать невозможно, а при больших значениях коэффициент Дарси необходимо определять с погрешностью не более 1 %.

В отечественной литературе часто предпочтение отдается универсальной формуле А.Д. Альтшуля из-за того, что λ в нее входит в явном виде

$$\lambda = 0{,}11\left(\frac{\Delta_э}{d} + \frac{68}{\mathrm{Re}_d}\right)^{0.2.5}. \qquad (5)$$

Однако ее можно использовать, как это следует из табл. 5, лишь при значениях $\Delta_э/r < 0{,}01$.

Таблица 5. **Сопоставление результатов расчетов по формулам Кольбрука и А.Д. Альтшуля**

$\Delta_э/r$	0,00005	0,0005	0,005	0,01	0,05	0,10
$\lambda_А$	0,01792	0,01921	0,02612	0,03020	0,04403	0,05219
$\lambda_К$	0,01808	0,01920	0,02628	0,03164	0,05327	0,07158
%	–0,9	0,05	–0,6	–5,0	–17,5	–26,0

При условии $\Delta_э/r > 0{,}01$, как неопровержимо показано в [15], формула Кольбрука имеет неоспоримое преимущество.

Протестируем формулу (5) на ее пригодность (при указанном ограничении) для использования в процедуре определения эквивалентной шероховатости.

Особый интерес представляет случай, когда область гладкостенного сопротивления наступает при достаточно высоких значениях числа Рейнольдса. При этом использование универсальных формул (типа Кольбрука или А.Д. Альтшуля) становится некорректным. Если принять за критерий определения начала зоны гладкостенного сопротивления, например, условие $(\mathrm{Re}_d)_{гл} = 15\dfrac{d}{\Delta_э}$, то при значении $\Delta_э/r = 0{,}00005$ окажется, что $(\mathrm{Re}_d)_{гл} = 600\,000$, а при $\Delta_э/r = 0{,}0005$ соответственно $(\mathrm{Re}_d)_{гл} = 60\,000$. Следовательно, при рассматриваемом условии ($\mathrm{Re}_d = 100\,000$) использовать анализируемые формулы в случае $\Delta_э/r < 0{,}0005$ нельзя.

Будем следовать принятой выше схеме, а соответствующие данные приведем в табл. 6, 7.

Таблица 6. **К оценке влияния погрешности в определении $\Delta_э/r$ на получаемую погрешность в коэффициенте Дарси при использовании формулы А.Д. Альтшуля**

$\Delta_э/r$		λ	%	$\Delta_э/r$		λ	%
$\Delta_э/r$	0,00005	0,01792	0,00	$\Delta_э/r$	0,0005	0,01921	0,00
1,01 $\Delta_э/r$	—	0,01793	0,03	1,01 $\Delta_э/r$	—	0,01922	0,06
1,05 $\Delta_э/r$	—	0,01793	0,07	1,05 $\Delta_э/r$	—	0,01927	0,33
1,10 $\Delta_э/r$	—	0,01794	1,12	1,10 $\Delta_э/r$	—	0,01934	0,66
1,20 $\Delta_э/r$	—	0,01796	2,44	1,20 $\Delta_э/r$	—	0,01952	1,64
$\Delta_э/r$	0,005	0,02612	0,00	$\Delta_э/r$	0,05	0,04403	0,00
1,05 $\Delta_э/r$	—	0,02637	0,97	1,01 $\Delta_э/r$	—	0,04456	1,20
1,15 $\Delta_э/r$	—	0,02662	1,92	1,05 $\Delta_э/r$	—	0,04507	2,36
1,25 $\Delta_э/r$	—	0,02732	4,59	1,10 $\Delta_э/r$	—	0,04556	3,48
				1,20 $\Delta_э/r$	—	0,04650	5,61

Таблица 7. **К оценке влияния погрешности в определении λ на получаемую погрешность в $\Delta_э/r$ при использовании формулы А.Д. Альтшуля**

λ		$\Delta_э/r$	%	λ		$\Delta_э/r$	%
λ	0,01792	0,00005	0,00	λ	0,01921	0,000500	0,00
1,01 λ	—	0,0000556	11,3	1,01 λ	—	0,000576	15,10
1,05 λ	—	0,000107	114,5	1,05 λ	—	0,000901	80,12
λ	0,02612	0,00500	0,00	λ	0,05330	0,05000	0,00
1,01 λ	—	0,00526	5,16	1,01 λ	—	0,05209	4,17
1,05 λ	—	0,00637	27,41	1,05 λ	—	0,07384	47,67

Изложенное выше полностью подтверждается данными табл. 6, 7. Так, из данных табл. 6 следует, что шероховатость фактически не влияет на значение коэффициента Дарси, а данные табл. 7 убедительно показывают, к каким нелепым результатам приводят малые погрешности в коэффициенте Дарси. То же самое обнаруживается и в табл. 4 для случая использования формулы Кольбрука. По указанным причинам она имеет преимущество по сравнению с формулой А.Д. Альтшуля.

Выводы. 1. Для повышения экономичности процедуры определения эквивалентной шероховатости можно рекомендовать формулу Кольбрука, как это предусмотрено ГОСТ 8.563.1–97.

2. Однако в упомянутый ГОСТ совершенно необходимо внести следующие обязательные требования:

— при назначении числа Рейнольдса нужно убедиться в заведомом обеспечении наступления зоны доквадратичного сопротивления;

— ввести требование обеспечения измерения потерь по длине с погрешностью не более 1 %. Для обеспечения этого условия потребовать использования манометров класса точности не менее 0,05.

3. Игнорирование изложенных положений чревато возможными тяжкими и неоправданными последствиями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Colebrook, C.F. Turbulence flow in pipes with particular Reference to the transition region between the smooth and rough pipe lines [Текст] / C.F. Colebrook // Journal of Institute of Civil Engineering. — 1939. — P. 133–156.
2. Гришанин, К.В. Динамика русловых потоков [Текст] / К.В. Гришанин. — Л. : Гидрометеоиздат, 1979. — 312 с.
3. Штеренлихт, Д.В. Гидравлика [Текст] / Д.В. Штеренлихт. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 640 с.
4. Альтшуль, А.Д. Гидравлические сопротивления [Текст] / А.Д. Альтшуль. — М. : Недра, 1970. — 216 с.
5. Избаш, С.В. Основы гидравлики [Текст] / С.В. Избаш. — М. : Стройиздат, 1952. — 304 с.
6. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя [Текст] / Г. Шлихтинг. — М. : Наука, 1974. — 712 с.
7. Гольдштейн, С. Современное состояние гидроаэродинамики вязкой жидкости [Текст] / С. Гольдштейн. — М. : Иностр. лит., 1948. — 396 с.
8. Киселев, П.Г. Справочник по гидравлическим расчетам [Текст] / П.Г. Киселев. — М. : Энергия, 1972. — 352 с.
9. Чугаев, Р.Р. Гидравлические термины [Текст] / Р.Р. Чугаев. — М. : Высшая школа, 1974. — 104 с.
10. Шевелев, Ф.А. Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах [Текст] / Ф.А. Шевелев. — М. : Госстройиздат, 1953. — 208 с.
11. Зегжда, А.П. Гидравлические потери на трение в трубопроводах и каналах [Текст] / А.П. Зегжда. — М. : Госстройиздат, 1957. — 256 с.
12. Nikuradse, J. Strdmungsgeseize in rauhen Rohren [Текст] / J. Nikuradse // Forsch. Geb. Ing.-Wes. Heft 361. — Berlin, 1933.
13. Гиргидов, А.Д. Механика жидкости и газа [Текст] / А.Д. Гиргидов. — Л. : Изд-во СПб. техн. ун-та, 1999. — 320 с.
14. Высоцкий, Л.И. Продольно-однородные осредненные турбулентные потоки [Текст] / Л.И. Высоцкий, И.С. Высоцкий. — Саратов : СГТУ, 2011. — 560 с.
15. Высоцкий, Л.И. Сопоставительный анализ формул для коэффициента Дарси (гладкие

трубы) [Текст] / Л.И. Высоцкий // Совершенствование методов гидравлических расчетов водопропускных и очистных сооружений: межвуз. науч. сб. — Саратов : СГТУ, 2015. — С. 5 –13.

ВЫСОЦКИЙ Лев Ильич, д-р техн. наук, проф.
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Получено 06.07.15

Vysotskiy Lev Ilich, doctor of technical sciences, professor, Saratov State Technical University, Russia

NOTES ON THE DEFINITION OF THE EQUIVALENT ROUGHNESS

The article considers some problems of definition equivalent relative roughness, which is currently not drawn attention, which can lead to serious consequences. To exclude such palesti is proposed to introduce in the standard relevant legislative requirements.

Key words: equivalent relative roughness, Darcy coefficient, error, the formula Colebrooke, the formula of Prandtl.

REFERENCES

1. Colebrook, C.F. Turbulence flow in pipes with particular Reference to the transition region between the smooth and rough pipe lines [Text] / C.F. Colebrook // Journal of Institute of Civil Engineering. — 1939. — P. 133–156.
2. Grishanin, K.V. Dynamics of channel flows [Text] / K.V. Grishanin. — L. : Gidrometeoizdat, 1979. — 312 p.
3. Shterenlikht, D.V. Hydraulics [Text] / D.V. Shterenlikht. — M. : Energoatomizdat, 1984. — 640 p.
4. Altshul, A.D. Hydraulic resistance [Text] / A.D. Altshul. — M. : Nedra, 1970. — 216 p.
5. Izbash, S.V. Fundamentals of hydraulics [Text] / C.V. Izbash. — M. : Stroyizdat, 1952. — 304 p.
6. Shlikhting, G. Boundary layer theory [Text] / G. Shlikhting. — M. : Nauka, 1974. — 712 p.
7. Goldshtein, S. The modern state hydroaerodynamics viscous liquid [Text] / S. Goldshtein. — M. : Foreign literature, 1948. — 396 p.
8. Kiselev, P.G. Handbook of hydraulic calculations [Text] / P.G. Kiselev. — M. : Energy, 1972. — 352 p.
9. Chugaev, R.R. Hydraulic terms [Text] / R.R. Chugaev. — M. : Higher school, 1974. — 104 p.
10. Shevelev, F.A. Study of basic hydraulic laws of turbulent flow in pipes [Text] / F.A. Shevelev. — M. : Gosstroyizdat, 1953. — 208 p.
11. Zegzhda, A.P. Hydraulic friction loss in pipelines and channels [Text] / A.P. Zegzhda. — M. : Gosstroyizdat, 1957. — 256 p.
12. Nikuradse, J. Strdmungsgeseize in rauhen Rohren [Text] / J. Nikuradse // Forsch. Geb. Ing.-Wes. Heft 361. — Berlin, 1933.
13. Girgidov, A.D. Fluid Mechanics [Text] / A.D. Girgidov. — L. : Publishing house of St. Petersburg Tech. University, 1999. — 320 p.
14. Vysotskiy, L.I. Longitudinally-averaged homogeneous turbulent flows [Text] / L.I. Vysotskiy, I.S. Vysotskiy. — Saratov : SSTU, 2011. — 560 p.
15. Vysotskiy, L.I. Comparative analysis of the formulas for the coefficient Darcy (smooth pipe) [Text] / L.I. Vysotskiy // Improvement of methods of hydraulic design culvert and wastewater treatment facilities: Intercollege scientific. sat. — Saratov : SSTU, 2015. — P. 5–13.

УДК 721/728 : 536.24

А.И. ГНЫРЯ, С.В. КОРОБКОВ, Д.И. МОКШИН, А.А. КОШИН, К.С. ГАУСС, О.О. АНОШКИНА, В.И. ТЕРЕХОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА МОДЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ЗДАНИЙ*

Часть 1
ОТДЕЛЬНО СТОЯЩИЕ ПРИЗМЫ РАЗЛИЧНОЙ ВЫСОТЫ

Приведены результаты цикла экспериментальных исследований локального и среднего коэффициентов теплообмена моделей в виде квадратных призм, которые моделируют отдельно стоящие здания. Представлены графики изменения локального и среднего коэффициентов теплоотдачи одиночно стоящей модели различной относительной высоты H/a = 1, 3, 6 в зависимости от числа Рейнольдса и угла атаки воздушного потока.

Ключевые слова: средний коэффициент теплообмена, число Рейнольдса, угол атаки воздушного потока, внешний теплообмен, физическое моделирование.

Данные исследования являются составной частью комплексных экспериментальных исследований аэромеханики и теплообмена моделей системы зданий при вариации их формы и расположения [1–5].

В имеющихся экспериментально-теоретических работах данного направления [6–15] решен ряд частных задач, который не может описать весь спектр возможных воздействий отрывных потоков формируемыми различными гранями. Конечная цель подобных исследований — разработка технически обоснованных норм на тепловые потери через ограждающие конструкции.

Методика проведения экспериментов и обработки результатов измерений представлена в [16, 17].

Для экспериментального исследования теплоотдачи моделей, имеющих определенную форму зданий, был создан аэродинамический стенд (рис. 1).

Рабочие модели для изучения теплообмена представляли собой призмы квадратного сечения со стороной a = 50 мм и относительной высотностью H/a = 1, 3, 6 (где H — высота модели). Все три модели были выполнены по одной конструктивной схеме (рис. 2). Каждая модель располагалась на дне рабочего канала трубы на поворотной платформе, что позволяло изменять угол атаки воздушного потока.

Исследуемые грани были разделены на сегменты и изготовлены из малотеплопроводного материала (нержавеющей стали), что позволило снизить продольные перетечки тепла.

Распределение температуры поверхности измерялось при помощи термопар (ХК) диаметром 0,2 мм, зачеканенных на одной из граней призмы на наружной поверхности и расположенных в горизонтальных и вертикальных сечениях.

* Исследования выполнены при финансовой поддержке работ по гранту РФФИ (проект №13-08-00505а).

© Гныря А.И., Коробков С.В., Мокшин Д.И., Кошин А.А., Гаусс К.С., Аношкина О.О., Терехов В.И., 2015

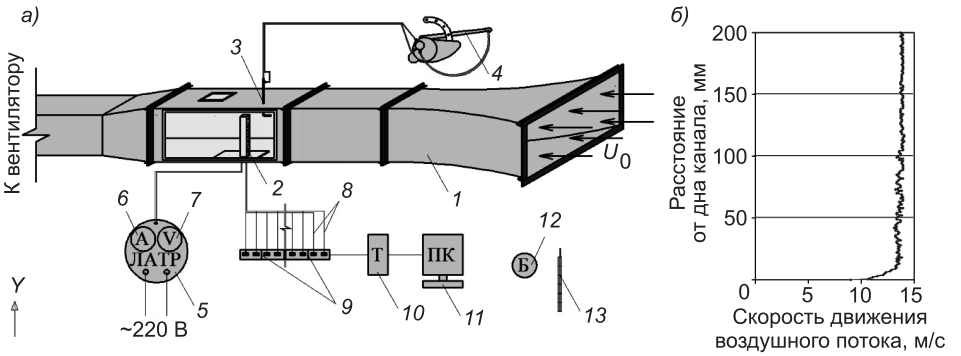


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для измерения локальной и средней теплоотдачи (*а*) и профиль скоростей воздушного потока воздуха (*б*) в аэродинамической трубе в сечении установки модели

1 — аэродинамическая труба; *2* — испытуемая модель; *3* — трубка Пито — Прандтля; *4* — микроманометр ММН-2400; *5* — автотрансформатор (ЛАТР) TDGC2-3k; *6* — амперметр; *7* — вольтметр; *8* — термопары или датчики теплового потока; *9* — адаптер термопар ТЕРЕМ-4; *10* — АЦП; *11* — ПК; *12* — барометр; *13* — термометр

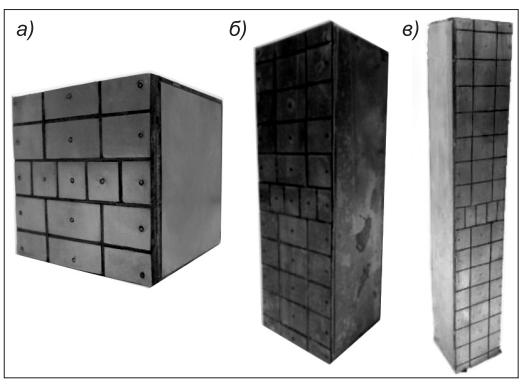


Рис. 2. Общий вид измерительных моделей
а — $H/a = 1$; *б* — $H/a = 3$; *в* — $H/a = 6$

Количество термодатчиков на измерительной грани для моделей $H/a = 1$ — 17 шт., $H/a = 3$ — 35 шт., $H/a = 6$ — 53 шт.

Коэффициенты локальной теплоотдачи измерялись по горизонтальным и вертикальным сечениям модели (рис. 3).

Все эксперименты проводились при вариации чисел Рейнольдса $\mathrm{Re} = U_0 \cdot a/\upsilon = 1{,}56 \cdot 10^4 \div 4{,}25 \cdot 10^4$ и углах атаки воздушного потока $\varphi = 0$ и 45°.

Модель устанавливалась на расстоянии 400 мм от начала рабочей части так, что толщина турбулентного пограничного слоя перед моделью была равной $\delta = 20 \div 30$ мм. В опытах поддерживался тепловой режим $q_{\text{ст}} = \text{const}$.

На рис. 4, 5 представлено распределение локального коэффициента теплообмена Нуссельта (Nu) по высоте и ширине граней модели различной высотности (H/a = 1, 3, 6) при двух углах атаки воздушного потока $\varphi = 0$ и 45° и числе Рейнольдса $\mathrm{Re} = 4{,}25 \cdot 10^4$.

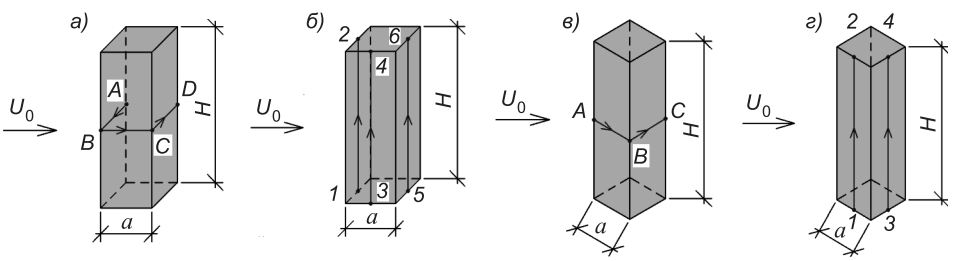


Рис. 3. Схема измерительных сечений моделей H/a = 1, 3, 6
а — по ширине, $\varphi = 0°$; *б* — по высоте, $\varphi = 0°$; *в* — по ширине, $\varphi = 45°$; *г* — по высоте, $\varphi = 45°$

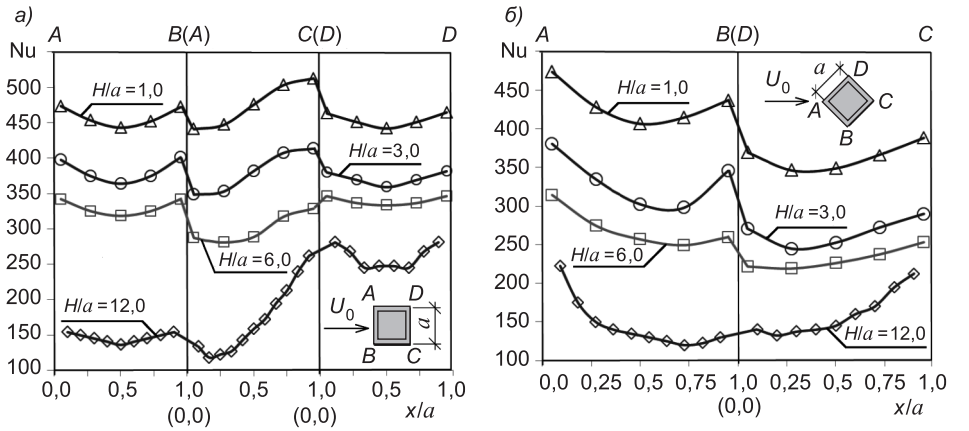


Рис. 4. Распределение локального числа Нуссельта по ширине граней модели для угла атаки φ = 0° (*а*) и φ = 45° (*б*)

Δ, ○ и □ — данные автора, Re = 4,25 · 10⁴; ◊ — данные T. Igarashi [10], Re = 4,44 · 10⁴

Для сравнения использовались данные по квадратной призме с соотношением сторон H/a = 12 [10].

Наиболее важный вывод, который следует из рис. 4, 5, заключается в том, что независимо от угла атаки по мере увеличения относительной высоты призмы интенсивность теплообмена значительно снижается. Более высокие модели (H/a = 12, двумерный случай) имеют теплоотдачу от боковых

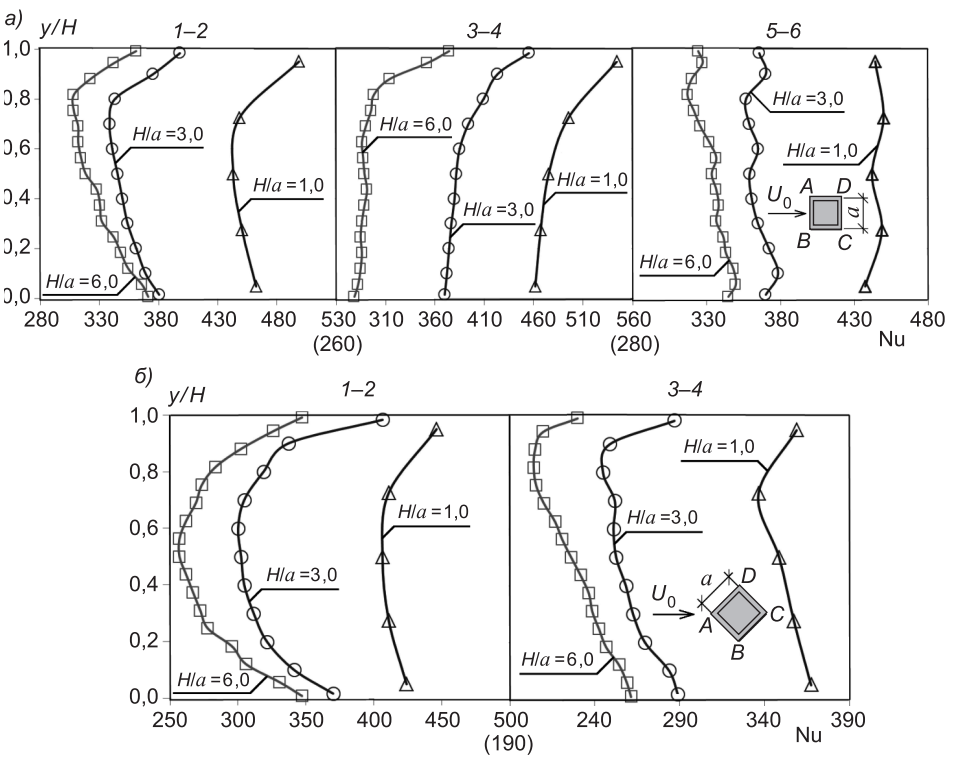


Рис. 5. Распределение локального числа Нуссельта по высоте граней модели при Re = 4,25·10⁴ для угла атаки φ = 0° (*а*) и φ = 45° (*б*)

граней примерно в 3 раза ниже, чем для куба (H/a = 1). Это объясняется как ухудшением условий растекания набегающего потока по поверхности призмы, так и снижением турбулентных пульсаций по мере увеличения ее высоты. Для модели соотношением H/a = 1 характерно значительное влияние пограничного слоя.

Следует особо подчеркнуть, что неравномерность локального коэффициента теплообмена Nu по периметру модели большая, и она может изменяться в 2 и более раз, это важно с точки зрения организации оптимального теплового состояния зданий и сооружений.

Для модели с соотношением сторон H/a = 1 среди четырех боковых поверхностей для случая угла атаки φ = 0° среднее по грани число Нуссельта (Nu) принимает наименьшее значение на кормовой грани (*C–D*), а наибольшее — на боковых (*B–C*) и (*D–A*) гранях. По мере увеличения относительной высоты модели H/a с 1 до 6 происходит перераспределение средних коэффициентов теплоотдачи по граням модели, вклад в общий теплообмен от боковых граней (*B–C*) и (*D–A*), особенно при больших числах Рейнольдса (Re), становится минимальным.

При угле атаки потока воздуха φ = 45° вследствие клинообразного режима симметричного обтекания призмы средние значения Нуссельта (Nu) на лобовых гранях (*A–B*) и (*D–A*) имеют одинаковую величину. Это же наблюдается на боковой (*B–C*) и кормовой (*C–D*) гранях.

При увеличении относительной высоты модели H/a с 1 до 6 максимальная теплоотдача находится на боковых гранях, а минимальная — на кормовых. Это условие сохраняется для всех моделей (H/a = 1, 3, 6). Однако средний теплообмен по аналогии с локальными значениями существенно снижается по мере увеличения относительной высоты призм.

Для прогнозирования тепловых потерь наибольший практический интерес представляют данные по средней теплоотдаче от всей поверхности модели. Такие результаты представлены на рис. 6 при разных числах Рейнольдса Re = $1{,}56 \cdot 10^4$; $3{,}13 \cdot 10^4$; $4{,}25 \cdot 10^4$ и двух углах атаки φ = 0 и 45°. Для сравнения на них представлены данные T. Igarashi [10], что соответствовало случаю обтекания одиночной призмы на плоскости с относительной высотой модели H/a = 12.

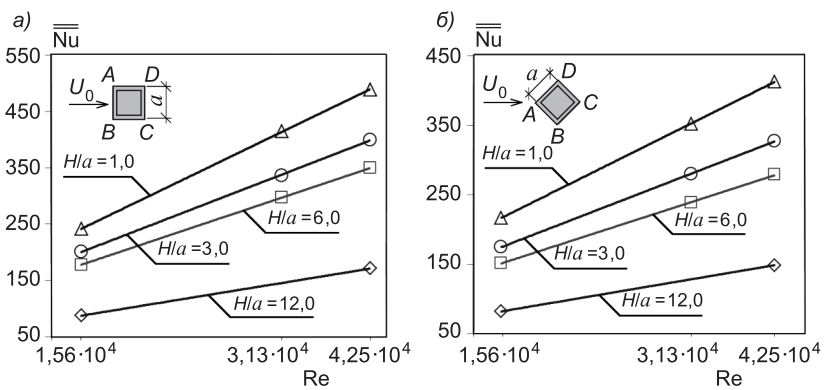


Рис. 6. Зависимость среднего числа Нуссельта от числа Рейнольдса при φ = 0 и 45°
а — угол атаки воздушного потока φ = 0°; *б* — угол атаки воздушного потока φ = 45°,
Δ, ○, □ — данные автора; ◊ — T. Igarashi

При увеличении числа Рейнольдса (Re) с $1{,}56 \cdot 10^4$ до $4{,}25 \cdot 10^4$ и угле атаки воздушного потока φ = 0° (см. рис. 6, *а*) происходит увеличение интегрального теплообмена от всей модели H/a = 1 в 2,03 раза. Для модели с H/a = 3 это значение увеличивается в 1,99 раза, а для H/a = 6 — в 1,97 раза. Также увеличение теплообмена от числа Рейнольдса (Re) в 1,94 раза наблюдается в работах T. Igarashi [10].

При увеличении числа Рейнольдса (Re) с $1{,}56 \cdot 10^4$ до $4{,}25 \cdot 10^4$ для угла атаки воздушного потока φ = 45° (см. рис. 6, *б*) происходит увеличение интегрального теплообмена от всей модели H/a = 1 в 1,9 раза. Для модели с H/a = 3 это значение увеличивается в 1,87 раза, а для H/a = 6 — в 1,84 раза. Согласно [10], увеличение теплообмена от числа Рейнольдса происходит в 1,81 раза.

Вместе с тем из рис. 6 также следует, что интегральный теплообмен от всей поверхности модели значительно снижается (в 2–3 раза) по мере увеличения относительной высоты модели H/a. Снижается при этом и показатель степени в эмпирических корреляциях $\mathrm{Nu} = C1 \cdot \mathrm{Re}^{C2}$. Все результаты по исследованию среднего теплообмена сведены в таблицу, в которой прослеживается четкая зависимость того, что по мере увеличения относительной высоты модели H/a снижается показатель степени $C2$.

Для моделей H/a = 1, 3, 6 изменение суммарного теплообмена близко к закономерностям развитого отрывного потока, поскольку величина $C2$ = 0,616÷0,717. Конечно, трудно было ожидать, что закон теплообмена будет описываться классическими зависимостями при ламинарном ($C2$ = 0,5), отрывном ($C2$ = 2/3) или турбулентном ($C2$ = 0,8) течениях. Дело в том, что каждая из исследуемых поверхностей модели подвергается различным аэродинамическим воздействиям, а суммарный теплообмен при этом является итогом сложных взаимосвязанных процессов переноса теплоты на каждой из граней.

Значения коэффициента *C*1 и показателя степени *C*2 в выражении $\mathrm{Nu} = C1\mathrm{Re}^{C2}$

H/a	1				3				6			
φ, град	φ = 0°		φ = 45°		φ = 0°		φ = 45°		φ = 0°		φ = 45°	
Константы	$C1$	$C2$	$C1$	$C2$	$C1$	$C2$	$C1$	$C2$	$C1$	$C2$	$C1$	$C2$
Грань (*A*–*B*)	0,23	0,72	0,438	0,653	0,448	0,636	0,298	0,67	0,099	0,776	0,282	0,66
Грань (*B*–*C*)	0,203	0,736	0,132	0,759	0,132	0,759	0,55	0,588	0,72	0,575	0,621	0,561
Грань (*C*–*D*)	0,365	0,671	0,37	0,65	0,479	0,624	0,55	0,588	0,089	0,784	0,621	0,561
Грань (*D*–*A*)	0,203	0,736	0,37	0,65	0,132	0,759	0,298	0,67	0,73	0,575	0,282	0,66
По призме	0,241	0,717	0,405	0,652	0,246	0,695	0,389	0,633	0,241	0,685	0,399	0,616

Из таблицы легко получить для каждого рассматриваемого случая критериальные соотношения $\mathrm{Nu} = C1 \cdot \mathrm{Re}^{C2}$. Полученные обобщающие зависимости рекомендуется использовать в инженерном проектировании для оценки величины тепловых потерь, а также теплового состояния зданий и сооружений подобной формы. Использование методов интерполяции позволит получить соответствующие закономерности теплообмена и для других высот призм.

Результаты исследований. 1. Установлено, что при увеличении числа Рейнольдса Re (с $1{,}56 \cdot 10^4$ до $4{,}25 \cdot 10^4$) величина интегрального теплообмена

от всей поверхности модели увеличивается в среднем в 1,8÷2,0 раза независимо от соотношения ее сторон *H*/*a*.

2. Изменение угла атаки воздушного потока φ (с 0 до 45°) приводит к снижению величины интегрального теплообмена на 15÷20 %.

3. Интегральный теплообмен значительно снижается (в 2–3 раза) по мере увеличения относительной высоты *H*/*a* модели. Снижается при этом и показатель степени в эмпирических корреляциях $Nu = C1 \cdot Re^{C2}$.

4. Механизм снижения теплообмена при увеличении относительной высоты *H*/*a* = 1–12 объясняется как ухудшением условий растекания набегающего потока по поверхности призмы, так и снижением турбулентных пульсаций по мере увеличения ее относительной высоты.

5. Получены новые критериальные соотношения для расчета средних коэффициентов теплоотдачи от каждой грани и в целом от одиночной модели здания различной высоты (*H*/*a* = 1, 3, 6) при двух углах атаки воздушного потока φ = 0 и 45°.

6. Полученные критериальные соотношения для одиночных призм позволяют оценить величины тепловых потерь, а также тепловое состояние зданий и сооружений призматической формы с соотношением сторон *H*/*a* = 1, 3, 6.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гныря, А.И. Результаты визуализации течения воздушного потока вдоль ряда из двух кубов, расположенных на плоскости друг за другом [Текст] / А.И. Гныря, В.И. Терехов, С.В. Коробков // Вестник ТГАСУ. — 2009. — № 3. — С. 117–124.
2. Гныря, А.И. Влияние числа Рейнольдса и угла атаки воздушного потока на распределение локального и среднего коэффициентов теплоотдачи моделей зданий [Текст] / А.И. Гныря, С.В. Коробков, Д.И. Мокшин, А.А. Кошин, В.И. Терехов // Вестник ТГСУ. — 2013. — № 3. — С. 320–328.
3. Гныря, А.И. Комплексные экспериментальные исследования аэродинамики и теплообмена моделей зданий и сооружений [Текст] / А.И. Гныря, С.В. Коробков, А.А. Кошин, Д.И. Мокшин, В.И. Терехов // Вестник ТГАСУ. — 2011. — № 4. — С. 113–126.
4. Гныря, А.И. Исследование теплообмена тандема моделей зданий при линейном их расположении [Текст] / А.И. Гныря, С.В. Коробков, А.П. Бояринцев, Д.И. Мокшин // Вестник ТГАСУ. — 2014. — № 5. — С. 90–97.
5. Мокшин, Д.И. Классификация факторов, влияющих на внешний теплообмен зданий и сооружений [Текст] / Д.И. Мокшин, С.В. Коробков // Новое слово в науке и практике: гипотезы и апробация результатов исследований. — 2014. — № 12. — С. 134–138.
6. Meinders, E.R. Local convective heat transfer from an array of wall-mounted cubes [Текст] / E.R. Meinders, T.H. Van Der Meer, K. Hanjalic // Int. J. Heat Mass Transfer. — 1997. — P. 335–346.
7. Meinders, E.R. Vortex structure and heat transfer in turbulent flow over a wall-mounted matrix of cubes [Текст] / E.R. Meinders, K. Hanjalic // Int. J. Heat Mass Transfer. — 1999. — P. 255–267.
8. Meinders, E.R. Experimental study of the convective heat transfer from in-line and staggered configurations of two wall-mounted cubes [Текст] / E.R. Meinders, K. Hanjalic // Int. J. Heat Mass Transfer. — 2002. — P. 465–482.
9. Goldstein, R.J. Convective mass transfer from a square cylinder and its base plate [Текст] / R.J. Goldstein, S.Y. Yoo, M.K. Chung // Int. J. Heat and Mass Transfer. — 1990. — Vol. 33, N 11. — P. 9–18.

10. I g a r a s h i, T. Local heat transfer from a square prism to an air stream [Текст] / T. Igarashi // Int. J. Heat and Mass Transfer. — 1986. — Vol. 29, N 5. — P. 777–784.
11. R e i h e r, H. Der warmeubergang von stromender luft an rohrbundel in kreuzstrom [Текст] / H. Reiher // VD1 Forshungsheft. — 1925. — N 269. — S. 47.
12. R o b e r t s o n, J.M. Wall pressures of separation-reattachment flow on a square in aniform flow [Текст] / J.M. Robertson, J.B. Wedding, J.A. Peterka, J.E. Cermak // J. Ind. Aerodyn. — 1977/1978. — N 2. — P. 345–359.
13. S a k a t a, H. A numerical analysis of unsteady separated flow by discrete vortex model (1st Report, Flow around a square prism) [Текст] / H. Sakata, T. Adashi, T. Inamuro // Trans. Soc. Mech. Engrs. — 1983. — P. 49–440, 801–808.
14. D o n g - H y e o g, Y o o n. Heat transfer enhancement in channel flow using an inclined square cylinder [Текст] / Yoon Dong-Hyeog, Yang Kyung-Soo, Choi Choon-Bum // J. of Heat Transfer. — 2009. — Vol. 131. — P. 1–4.
15. D u t t a, S.Influence of the orientation of a square cylinder on the wake properties [Текст] / S. Dutta, K. Muralidhar, P.K. Panigrahi // Experiments in Fluids. — 2003. — Vol. 34. — P. 16–23.
16. М о к ш и н, Д.И. Методика проведения и обработки экспериментов по исследованию локальной и средней теплоотдачи зданий и сооружений [Текст] / Д.И. Мокшин, С.В. Коробков // Наука и современность. — 2014. — № 31. — С. 112–122.
17. М о к ш и н, Д.И. Расчет локального коэффициента конвективной теплоотдачи с помощью программы ЭВМ [Текст] / Д.И. Мокшин, С.В. Коробков // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. — 2014. — № 13. — С. 216–223.

ГНЫРЯ Алексей Игнатьевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: sp_tgasu@mail.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет
КОРОБКОВ Сергей Викторович, канд. техн. наук, доц.; E-mail: korobkov@hotmail.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет
МОКШИН Дмитрий Ильич, ассист.; E-mail: mokshin@sibmail.com
Томский государственный архитектурно-строительный университет
КОШИН Антон Александрович, ст. препод.; E-mail: dawghood@mail.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет
ГАУСС Ксения Сергеевна, ассист.; E-mail: gauss.ksyu@mail.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет
АНОШКИНА Ольга Олеговна, асп.; E-mail: anoshkina_22@mail.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет
ТЕРЕХОВ Виктор Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: terekhov@itp.nsc.ru
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Получено 03.07.15

Gnyrya Alexey Ignatievich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: sp_tgasu@mail.ru, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Korobkov Sergey Viktorovich, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: korobkov@hotmail.ru, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Mokshin Dmitriy Iljich, assistant; E-mail: mokshin@sibmail.com, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Koshin Anton Alexandrovich, senior lecturer; E-mail: dawghood@mail.ru, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Gauss Kseniya Sergeevna, assistant; E-mail: gauss.ksyu@mail.ru, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Anoshkina Olga Olegovna, post-graduate student; E-mail: anoshkina_22@mail.ru, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Terekhov Viktor Ivanovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: terekhov@itp.nsc.ru, Kutateladze Institute of Thermal Physics SB RAS, Russia

HEAT TRANSFER MODEL OF THE SYSTEM OF THE BUILDING

Part 1
DETACHED PRISM DIFFERENT HEIGHTS

The results of experimental studies of the local loop and the average coefficient of heat transfer models in the form of a square prism that simulate separate buildings. The article presents graphs of the local and average heat transfer coefficients single standing models with different height H/a = 1, 3, 6 depending on the Reynolds number and angle of attack of the airflow.

Key words: average coefficient of heat transfer, Reynolds number, angle of attack of the air stream, external heat transfer, physical modeling.

REFERENCES

1. Gnyrya, A.I. The results of flow visualization of airflow along the row of two cubes located on the plane each other [Text] / A.I. Gnyrya, V.I. Terekhov, S.V. Korobkov // Vestnik of TSUACE. — 2009. — N 3. — P. 117–124.
2. Gnyrya, A.I. Distribution of local and average heat transfer coefficients depending on Reynolds criterion and angle of attack [Text] / A.I. Gnyrya, S.V. Korobkov, D.I. Mokshin, A.A. Koshin, V.I. Terekhov // Vestnik of TSUACE. — 2013. — N 3. — P. 320–328.
3. Gnyrya, A.I. Complex experimental studies of aerodynamics and heat transfer models of buildings and structures [Text] / A.I. Gnyrya, S.V. Korobkov, A.A. Koshin, D.I. Mokshin, V.I. Terekhov // Vestnik of TSUACE. — 2011. — N 4. — P. 113–126.
4. Gnyrya, A.I. Heat transfer in building models at tandem linear arrangement [Text] / A.I. Gnyrya, S.V. Korobkov, A.P. Boyarintsev, D.I. Mokshin // Vestnik of TSUACE. — 2014. — N 5. — P. 90–97.
5. Mokshin, D.I. Classification of the factors affecting the external heat buildings [Text] / D.I. Mokshin, S.V. Korobkov // The new word in the science and practice: the hypothesis testing and the results of research. — 2014. — N 12. — P. 134–138.
6. Meinders, E.R. Local convective heat transfer from an array of wall-mounted cubes [Text] / E.R. Meinders, T.H. Van Der Meer, K. Hanjalic // Int. J. Heat Mass Transfer. — 1997. — P. 335–346.
7. Meinders, E.R. Vortex structure and heat transfer in turbulent flow over a wall-mounted matrix of cubes [Text] / E.R. Meinders, K. Hanjalic // Int. J. Heat Mass Transfer. — 1999. — P. 255–267.
8. Meinders, E.R. Experimental study of the convective heat transfer from in-line and staggered configurations of two wall-mounted cubes [Text] / E.R. Meinders, K. Hanjalic // Int. J. Heat Mass Transfer. — 2002. — P. 465–482.
9. Goldstein, R.J. Convective mass transfer from a square cylinder and its base plate [Text] / R.J. Goldstein, S.Y. Yoo, M.K. Chung // Int. J. Heat and Mass Transfer. — 1990. — Vol. 33, N 11. — P. 9–18.
10. Igarashi, T. Local heat transfer from a square prism to an air stream [Text] / T. Igarashi // Int. J. Heat and Mass Transfer. — 1986. — Vol. 29, N 5. — P. 777–784.
11. Reiher, H. Der warmeubergang von stromender luft an rohrbundel in kreuzstrom [Text] / H. Reiher // VD1 Forshungsheft. — 1925. — N 269. — S. 47.
12. Robertson, J.M. Wall pressures of separation-reattachment flow on a square in aniform flow [Text] / J.M. Robertson, J.B. Wedding, J.A. Peterka, J.E. Cermak // J. Ind. Aerodyn. — 1977/1978. — N 2. — P. 345–359.
13. Sakata, H. A numerical analysis of unsteady separated flow by discrete vortex model (1st Report, Flow around a square prism) [Text] / H. Sakata, T. Adashi, T. Inamuro // Trans. Soc. Mech. Engrs. — 1983. — P. 49–440, 801–808.

14. Dong-Hyeog, Yoon. Heat transfer enhancement in channel flow using an inclined square cylinder [Text] / Yoon Dong-Hyeog, Yang Kyung-Soo, Choi Choon-Bum // J. of Heat Transfer. — 2009. — Vol. 131. — P. 1–4.
15. Dutta, S. Influence of the orientation of a square cylinder on the wake properties [Text] / S. Dutta, K. Muralidhar, P.K. Panigrahi // Experiments in Fluids. — 2003. — Vol. 34. — P. 16–23.
16. Mokshin, D.I. Method of and processing of experiments to investigate the local and average heat transfer of buildings [Text] / D.I. Mokshin, S.V. Korobkov // Science and modernity. — 2014. — N 31. — P. 112–122.
17. Mokshin, D.I. The calculation of the local convective heat transfer coefficient with the help of computer programs [Text] / D.I. Mokshin, S.V. Korobkov // Basic and applied research: challenges and results. — 2014. — N 13. — P. 216–223.

УДК 697.442.8 : 621.791.725

И.А. КНЯЗЕВА, Я.Д. ЗОЛОТОНОСОВ, В.А. ЛИСОВСКИЙ

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА БАЗЕ ПРУЖИННО-ВИТЫХ КАНАЛОВ

Для изготовления теплообменных элементов на основе пружинно-витых каналов кожухотрубчатых теплообменных аппаратов оптимальной с точки зрения технико-экономических показателей является технология лазерной сварки. Представлены результаты исследований сварных швов, полученных в ходе опытной работы по определению оптимальных режимов лазерной сварки пружинно-витых каналов из стали марки 12Х18Н10Т. Для этой цели был проведен металлографический анализ сварных швов, испытания на разрыв. Результаты исследований показали, что импульсная лазерная сварка позволяет значительно минимизировать влияние внутренних послесварочных напряжений на геометрические параметры пружинно-витых каналов, а также избежать появления трещин, но не в полной мере обеспечивает требуемую глубину проплавления.

Ключевые слова: теплообменные аппараты, пружинно-витой канал, лазерная сварка, импульсное лазерное излучение, непрерывное лазерное излучение, микроструктура сварного шва, твердость.

Прямой пружинно-витой канал представляет собой пружину круглого сечения, витки которой жестко скреплены между собой посредством сварки [1]. Получение таких каналов может быть реализовано путем непрерывной подачи проволоки на направляющее устройство, которое формирует спираль из проволоки таким образом, что витки спирали плотно расположены друг к другу и свариваются посредством лазерной сварки.

Высокая производительность процесса лазерной сварки, малая зона термического влияния, а следовательно, и невысокие остаточные напряжения, возможность контроля параметров лазерной сварки в каждый момент времени делают возможным производство пружинно-витых каналов высокого качества.

Технологические особенности лазерной сварки пружинно-витых каналов были описаны в работах [2–4].

Перед выполнением лазерной сварки, как правило, проводится входной контроль качества основных, вспомогательных материалов, исправности работы оборудования, правильности выставления режима сварки и контроль качества сварного соединения. О качестве выполнения сварного шва можно судить после проведения:

— метрологического контроля геометрических размеров пружинно-витых каналов;

— металлографического контроля сварных соединений пружинно-витых каналов;

— пневмогидравлического испытания пружинно-витых каналов.

Металлографический контроль проводится с целью установления соответствия фактических размеров сварного узла требуемым. При этом конт-

© Князева И.А., Золотоносов Я.Д., Лисовский В.А., 2015

ролируется длина пружинно-витого канала теплообменного аппарата — l, мм; глубина проплавления — h, мм; изменение толщины стенки трубы от фактического диаметра проволоки — t, мм.

Металлографический контроль сварных соединений пружинно-витых каналов выполняется с целью исследования сварного шва на наличие дефектов в виде пор, трещин, несплавлений, структуры шва и зоны термического влияния. Характер структуры металла шва позволяет оценить его механические свойства.

Пневмогидравлические испытания проводятся с целью проверки плотности шва. Гидравлические испытания, помимо проверки плотности швов, дают возможность определить прочность пружинно-витого канала при нагрузках [3].

Подбор режимов лазерной сварки был произведен на основе математической модели лазерной сварки [5, 6]. Для оценки адекватности математической модели и правильности подбора режимов сварки были проведены металлографические исследования сварных швов, выполненных на образцах-свидетелях. Один образец был сварен посредством лазерной сварки непрерывным лазерным излучением, второй — многопроходной лазерной сваркой импульсным лазерным излучением.

На рис. 1 представлен внешний вид образца-свидетеля пружинно-витого канала, изготовленного с применением технологии лазерной сварки.

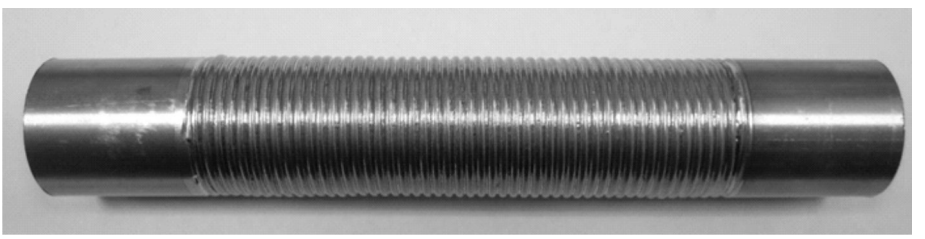


Рис. 1. Внешний вид образца-свидетеля пружинно-витого канала

Мощность излучения (энергия импульса) и скорость сварки подбирались на основании математической модели, исходя из требуемой глубины проплавления металла, и производительности лазерной сварки.

Для проведения металлографического анализа были подготовлены микрошлифы. Способ приготовления микрошлифов заключался в механическом шлифовании и последующем полировании образцов алмазными пастами. Для выявления микроструктуры использовался водный раствор сульфата меди и соляной кислоты следующего состава: сульфат меди — 4 г, соляная кислота — 20 мл, вода — 20 мл. Время травления проката из нержавеющей стали аустенитного класса в значительной степени зависело от химического состава проката и составляло от 1 до 2 мин.

Структура сварных швов (на поперечных микрошлифах) была исследована с помощью оптического микроскопа Neophot 4. Захват изображения осуществлялся с помощью оптической системы Opticam 5. Измерения геометрических параметров проводились с помощью специализированного программного комплекса Optika Vision Pro V.2.7. Твердость сварного шва, зоны термического влияния, основного металла определялась на твердомере типа «Виккерс» при нагрузке 1 кг.

Как видно из рис. 2, 3, сварной шов, полученный лазерной сваркой непрерывным лазерным излучением, по сравнению со швом, полученным многопроходной сваркой импульсным лазерным излучением, имеет большую глубину проплавления и значительно меньшую зону термического влияния. Ширина сварного шва, полученного непрерывным лазерным излучением, составила 0,7 мм, глубина проплавления — 1,0 мм, при импульсной лазерной сварке ширина сварного шва — 0,35 мм, а глубина проплавления — 0,5 мм. В сварном шве, полученном сваркой непрерывным лазерным излучением, наблюдаются дефекты в виде пор, во втором же образце не происходит формирования корня шва. Эти дефекты связаны с высокой скоростью сварки, малыми размерами сварного шва и соответственно высокими скоростями кристаллизации расплавленного металла. Из-за высокой скорости кристаллизации пузырьки воздуха не успевают покинуть жидкую

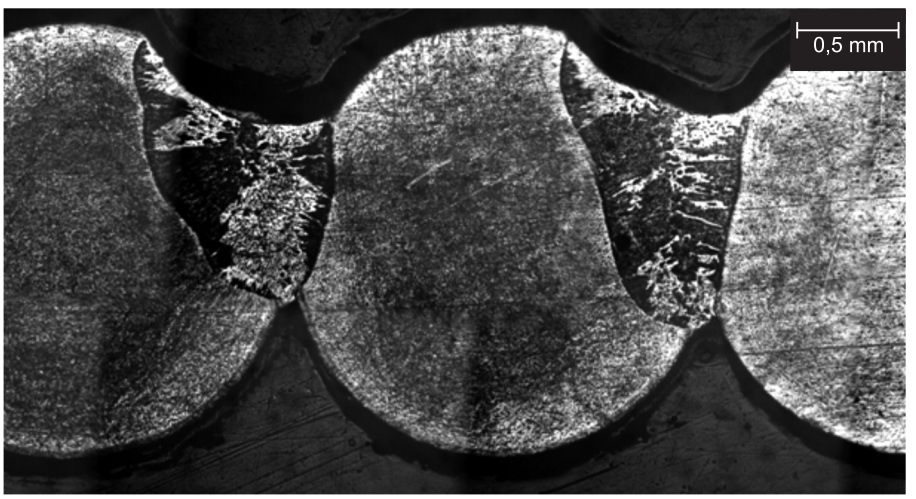


Рис. 2. Общий вид области сварного шва пружинно-витого канала, полученного сваркой непрерывным лазерным излучением

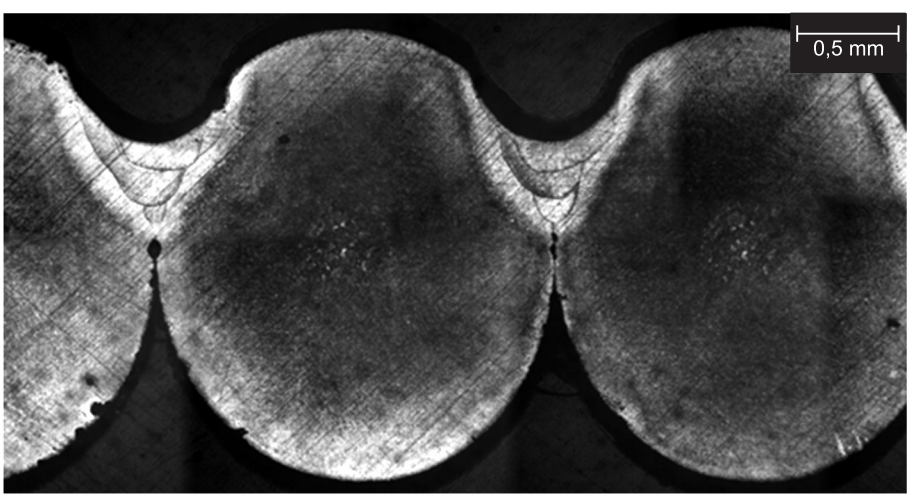


Рис. 3. Общий вид области сварного шва пружинно-витого канала, полученного многопроходной сваркой импульсным лазерным излучением

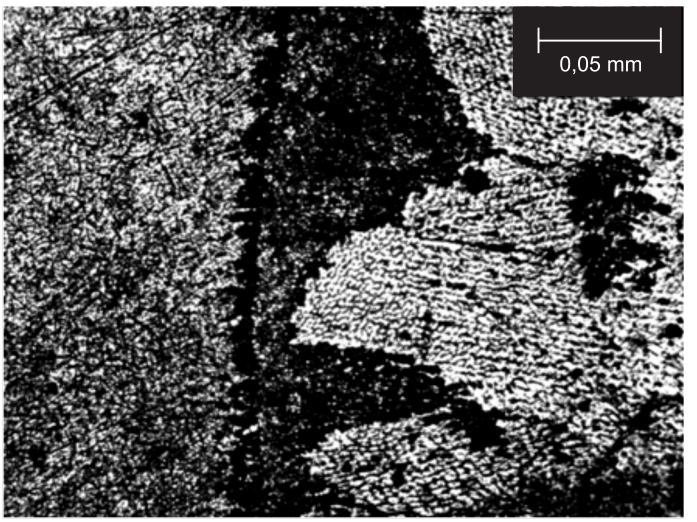


Рис. 4. Микроструктура металла переходной зоны сварного шва пружинно-витого канала, полученного сваркой непрерывным лазерным излучением (×100)

сварочную ванну, образуя поры. Для устранения подобных дефектов необходимо увеличивать время пребывания металла в жидкой фазе.

Сварные швы, полученные различными способами сварки, имеют также разную структуру. При лазерной сварке пружинно-витого канала непрерывным лазерным излучением формируется мелкозернистая структура шва (рис. 4).

Макроструктура сварного соединения состоит из вытянутых кристаллитов, растущих в направлении отвода теплового потока, от краев сварочной ванны в глубь шва. Кристаллиты образованы более мелкими дендритами аустенита длиной от 30 до 50 мкм. Зона термического влияния ярко выражена, размер ее составляет порядка 20 мкм. В результате нагрева до высокой температуры под действием сварочного термического цикла вероятно выделение карбидов в зоне термического влияния, о чем свидетельствует более высокое значение твердости в этой зоне по сравнению с основным металлом.

Микроструктура сварного соединения, полученного многопроходной импульсной лазерной сваркой, отличается более высокой дисперсностью (рис. 5). Дендриты в сварочной ванне разориентированы, по своей форме близки к равноосному зерну и имеют размер в среднем 20–30 мкм, что в конечном итоге может положительно повлиять на стойкость к образованию холодных трещин.

На процесс формирования микроструктуры сварного шва и околошовной зоны существенно оказывают влияние параметры термического цикла сварки. Вследствие малого объема расплава сварочной ванны и ограниченного времени воздействия лазерного излучения наблюдаются отличия лазерной сварки, состоящие в высокой дисперсности структурных составляющих и меньших размерах всех зон по сравнению с традиционными видами сварки. Это объясняется тем, что развитие тепловых процессов в свариваемом изделии, приводящих к нагреву свариваемых кромок, начинается непо-

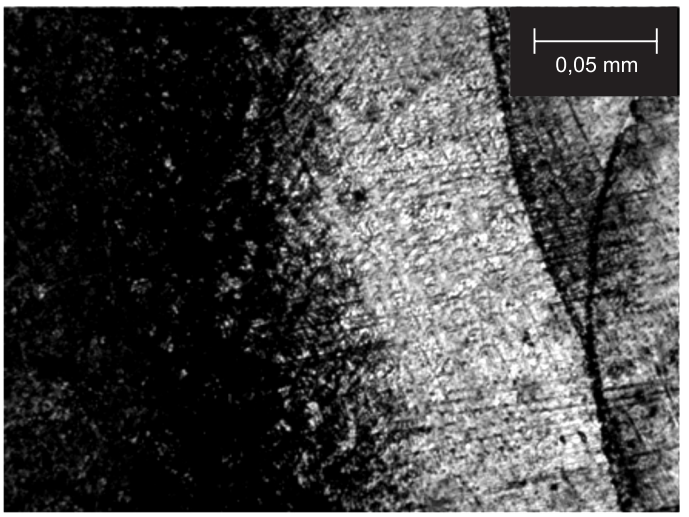


Рис. 5. Микроструктура металла переходной зоны сварного шва пружинно-витого канала, полученного сваркой импульсным лазерным излучением (×100)

средственно в зоне фокального пятна лазерного излучения на поверхности обрабатываемых материалов и переноса тепловой энергии от поверхности в глубь материала за счет их теплопроводности.

Из методов оценки механических свойств сварных швов регламентирован и применим в данном случае метод измерения твердости.

Согласно п.4.10.4 ПБ 03-585–03 «Правила проектирования, изготовления и приемки сосудов и аппаратов стальных сварных», твердость металла шва сварных соединений из стали аустенитного класса должна быть не более 208 HV.

В результате проведенных исследований твердость основного металла составляет 188…196 HV, твердость сварного шва, полученного непрерывным лазерным излучением, — 163…196 HV, твердость переходной зоны — 194...232 HV, а импульсным — 174…192 HV, 162…175 HV соответственно. Таким образом, при импульсной лазерной сварке наблюдается разупрочнение зоны термического влияния.

С уменьшением размера зерна увеличивается количество стыков зерен как возможных источников зарождения межкристаллитной коррозии, но сводится к минимуму вероятность ее глубокого проникновения в металл. С учетом рабочих режимов, имеющих место при работе кожухотрубчатого теплообменного аппарата, можно сказать, что коррозионная стойкость сварного соединения выше уровня коррозионной стойкости основного металла.

В качестве особенности лазерной сварки стоит отметить высокие требования к качеству стыковки свариваемых поверхностей: из-за большого зазора между свариваемыми витками наблюдается недостаточная глубина проплавления.

Кроме того, для оценки качества сварного соединения были проведены испытания на механическую прочность сварного шва. Исследования и испытания сварных швов на механическую прочность проводятся согласно требованиям ГОСТ 6996–66 «Методы определения механических свойств».

Согласно данному стандарту были проведены испытания сварного соединения на статическое (кратковременное) растяжение.

Испытание на статическое растяжение проводится для определения следующих характеристик механических свойств материалов:

— предела текучести (физического) $\sigma_т$, МПа;

— предела текучести (условного) $\sigma_{0,2}$, МПа;

— временного сопротивления $\sigma_в$, МПа;

— относительного удлинения после разрыва δ, %;

— относительного сужения после разрыва ψ, %.

При испытании сварного соединения на статическое растяжение определяют только временное сопротивление ($\sigma_в$) наиболее слабого участка.

Для испытания сварного шва на статическое растяжение был подготовлен плоский образец толщиной 2 мм со скосом кромок, сваренный импульсной лазерной сваркой, имитирующий сварное соединение пружинно-витого канала.

Внешний вид образца после испытания на статическое растяжение представлен на рис. 6.

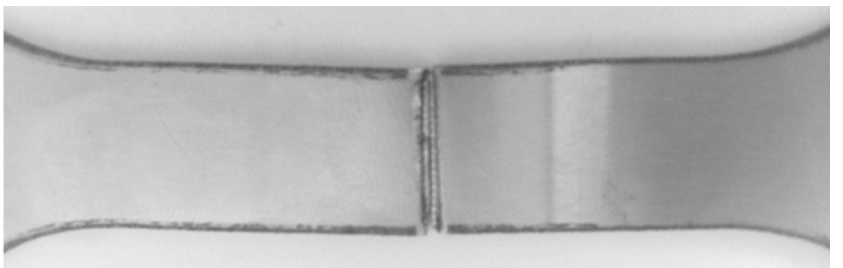


Рис. 6. Образец сварного соединения стали 12Х18Н10Т после испытания на разрыв

Результаты проведенных испытаний представлены в таблице, где приведены средние значения величин по трем испытаниям. Разброс значений составил не более 5 %. Как видно из результатов, предел выносливости сварного шва находится на уровне основного металла. Предел текучести, относительное удлинение и сужение образцов определить не удалось, так как имеет место хрупкое разрушение, которое объясняется тем, что площадь поперечного сечения сварного шва в результате скоса кромок на 50 % меньше поперечного сечения основного металла.

Механические характеристики образцов 12Х18Н10Т

Образец	$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %	ψ, %
Сварной шов	460	—	—	—
Основной металл	505	270	60,0	66,0

Выводы. Вследствие проведенного металлографического анализа сварных швов, выполненных непрерывным и импульсным лазерным излучением:

— более высокое качество сварного шва обеспечивается импульсным лазерным излучением;

— при сварке непрерывным лазерным излучением происходит упрочнение зоны термического влияния, повышается склонность к образованию холодных трещин;

— зона термического влияния при однопроходной лазерной сварке непрерывным лазерным излучением значительно меньше, чем при многопроходной импульсной лазерной сварке.

Таким образом, высокое качество шва, снижение влияния сварочных напряжений за счет уменьшения тепловложений позволяют прогнозировать положительные результаты в деле модернизации технологии изготовления пружинно-витого канала кожухотрубчатого теплообменного аппарата из стали 12Х18Н10Т с использованием импульсной лазерной сварки при повышении энергии импульса.

Импульсная лазерная шовная сварка осуществляется с помощью импульсного излучения с высокой частотой следования импульсов. При этом как скорость, так и глубина сварки будут зависеть от теплофизических свойств свариваемых материалов. При средней мощности лазерного излучения 100–200 Вт, частоте следования импульсов до 20–50 Гц и глубине проплавления до 0,3 мм можно выполнять шовную сварку со скоростью до 1,0–1,5 м/мин.

Повысить производительность импульсной лазерной сварки можно за счет увеличения энергии импульса, но необходимо учитывать, что с увеличением энергии излучения в импульсе в современных лазерных установках частота следования импульсов снижается. Для увеличения производительности (скорости) сварки возможно фокусирование излучения не в круглое пятно, а в прямоугольное или овальное [7, 8].

Полученные результаты механических характеристик и микроструктуры сварного шва и зоны термического влияния показывают преимущества лазерной сварки при производстве оборудования данного типа. Высокая степень автоматизации процесса лазерной сварки и высокая производительность работ делают данную технологию перспективной.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Багоутдинова, А.Г. Энергоэффективные теплообменные аппараты на базе теплообменных элементов в виде пружинно-витых каналов [Текст] / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов, С.А. Мустакимова // Изв. КГАСУ. — 2012. — № 3 (21). — С. 86–95.
2. Чирков, А.М. Применение лазерной сварки для производства кожухотрубчатых теплообменных аппаратов нового поколения на базе пружинно-витых каналов [Текст] / А.М. Чирков, И.А. Князева, А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов // Изв. КГАСУ. — 2011.— № 3 (21). — С. 120–126.
3. Чирков, А.М. Технологические особенности лазерной сварки пружинно-витых каналов теплообменных аппаратов [Текст] / А.М. Чирков, И.А. Князева, Я.Д. Золотоносов // Изв. КГАСУ. — 2012. — № 4 (22). — С. 240–244.
4. Чирков, А.М. Применение лазерной сварки для производства кожухотрубчатых теплообменных аппаратов нового поколения на базе пружинно-витых каналов [Текст] / А.М. Чирков, И.А. Князева, Я.Д. Золотоносов, А.Г. Багоутдинова // Изв. КГАСУ. — 2013. — № 1 (23). — С. 154–158.
5. Князева, И.А. Выбор математической модели для описания теплового процесса лазерной сварки пружинно-витых каналов [Текст] / И.А. Князева, Я.Д. Золотоносов, А.Г. Багоутдинова // Изв. КГАСУ. — 2013. — № 3 (25). — С. 67–72.

6. Князева, И.А. Оптимизация мощности лазерного излучения при сварке пружинно-витых каналов [Текст] / И.А. Князева, Я.Д. Золотоносов // Изв. КГАСУ. — 2014. — № 2 (28). — С. 116–120.
7. Катаяма, С. Справочник по лазерной сварке [Текст] / С. Катаяма. — М. : Техносфера, 2015. — 704 с.
8. Мелюков, В.В. Технологии импульсной лазерной сварки [Текст] / В.В. Мелюков, А.М. Чирков, А.В. Орехов // Сварка и диагностика. — 2009. — № 4. — С. 37–42.

КНЯЗЕВА Ираида Александровна, асп.; E-mail: iraida_knyazeva@mail.ru
Казанский государственный архитектурно-строительный университет
ЗОЛОТОНОСОВ Яков Давидович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: zolotonosov@mail.ru
Казанский государственный архитектурно-строительный университет
ЛИСОВСКИЙ Виталий Алексеевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: vitallis@rambler.ru
Вятский государственный университет

Получено 08.07.15

Knyazeva Iraida Alexandrovna, post-graduate student; E-mail: iraida_knyazeva@mail.ru, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia
Zolotonosov Yakov Davidovich, doctor of technical sciences, professor; E-mail: zolotonosov@mail.ru, Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia
Lisovskiy Vitaliy Alexeevich, candidate of technical sciences, assistant professor; E-mail: vitallis@rambler.ru, Vyatka State University, Russia

PRODUCTION OF SPRING-TWISTED CHANNEL OF HEAT EXCHANGERS BY LASER WELDING

For the manufacture of heat exchange elements on the basis of a spring-twisted channels for shell and tube heat exchangers optimal in terms of technical and economic performance is the technology of laser welding. This article presents the results of investigations of welds obtained during the experimental work to determine the best modes of laser welding spring-twisted steel channels 12X18H10T. For this purpose was conducted metallographic analysis weld tensile tests. Research has shown that the pulsed laser welding can significantly minimize the impact of internal post-weld stress on geometrical parameters spring-twisted channels as well as to avoid the appearance of cracks, but does not fully provide the desired depth of penetration.

Key words: heat exchangers, the helical spring-channel, laser welding, pulsed laser radiation, a continuous laser beam, the microstructure of the weld, the hardness.

REFERENCES

1. Bagoutdinova, A.G. Energy-efficient heat-exchange devices based on heat-exchange elements in the form of a spring-twisted channels [Text] / A.G. Bagoutdinova, Ya.D. Zolotonosov, S.A. Mustakimova / Izv. KSUAE. — 2012. — N 3 (21). — P. 86–95.
2. Chirkov, A.M. The use of laser welding for the production of shell and tube heat exchangers on the basis of a new generation spring-twisted channels [Text] / A.M. Chirkov, I.A. Knyazeva, A.G. Bagoutdinova, Ya.D. Zolotonosov // Izv. KSUAE. — 2011. — N 3 (21). — P. 120–126.
3. Chirkov, A.M. Technological features laser welding spring-twisted-channel heat exchangers [Text] / A.M. Chirkov, I.A. Knyazeva, Ya.D. Zolotonosov // Izv. KSUAE. — 2012. — N 4 (22). — P. 240–244.
4. Chirkov, A.M. Laser welding for the production of shell and tube heat exchangers on the basis of a new generation spring-twisted channels [Text] / A.M. Chirkov, I.A. Knyazeva, Ya.D. Zolotonosov, A.G. Bagoutdinova // Izv. KSUAE. — 2013. — N 1 (23). — P. 154–158.

5. Knyazeva, I.A. Selecting a mathematical model to describe the heat of the laser welding spring-twisted channels [Text] / I.A. Knyazeva, Ya.D. Zolotonosov, A.G. Bagoutdinova // Izv. KSUAE. — 2013. — N 3 (25). — P. 67–72.
6. Knyazeva, I.A. Optimization of the laser power for welding spring-twisted channel [Text] / I.A. Knyazeva, Ya.D. Zolotonosov // Izv. KSUAE. — 2014. — N 2 (28). —P . 116–120.
7. Katayama, S. Manual laser welding [Text] / S. Katayama. — M. : Technosphera, 2015. — 704 p.
8. Melyukov, V.V. Technologies pulsed laser welding [Text] / V.V. Melyukov, A.M. Chirkov, A.V. Orekhov // Welding and diagnostics. — 2009. — N 4. — P. 37–42.

НАШИ ЮБИЛЯРЫ

ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНЫЙ МЕЖДУНАРОДНОГО МАСШТАБА В ОБЛАСТИ ГИДРОДИНАМИКИ

(Олегу Федоровичу Васильеву — 90 лет)

1 августа 2015 г. исполнилось 90 лет со дня рождения и 70 лет научной, научно-организационной и педагогической деятельности крупному ученому в области прикладной гидродинамики и гидравлики, доктору технических наук, профессору, действительному члену Российской академии наук Олегу Федоровичу Васильеву.

Становление личности Олега Федоровича пришлось на годы Великой Отечественной войны: строительство оборонительных сооружений под Москвой, учеба в пехотном училище, Калининский и 3-й Белорусский фронты, тяжелое ранение под Витебском, госпиталь.

Учеба в Московском гидромелиоративном институте (МГМИ) по специальности «Гидротехника и мелиорация», который он закончил в 1948 г., получив специальность инженера-гидротехника, пришлась на тяжелые

послевоенные годы. В 1951 г. он завершил обучение в аспирантуре по кафедре гидравлики того же вуза защитой кандидатской диссертации.

С 1951 по 1959 г. Олег Федорович работал на кафедре гидравлики Московского инженерно-строительного института им. В.В. Куйбышева (МИСИ), сочетая преподавательскую работу с научной деятельностью. Тогда же О.Ф. Васильев начал теоретические и экспериментальные исследования судопропускного сооружения нового типа — наклонного судоподъемника в связи с проектированием судоходных сооружений Братского гидроузла (правда, так и нереализованного в действительности).

В 1959 г. Олег Федорович по приглашению академика П.Я. Кочиной переезжает в Новосибирск и принимает активное участие в становлении Института гидродинамики (ИГиЛ). Здесь им были продолжены начатые в МИСИ исследования по гидродинамике наклонных судоподъемников. Полученные результаты стали основой его докторской диссертации «Вопросы гидродинамики судоходных сооружений», защищенной в 1959 г., и были реализованы на практике при обосновании основных параметров уникального гидротехнического сооружения — Красноярского судоподъемника. При этом возглавляемым Олегом Федоровичем коллективом ученых из Института гидродинамики СО АН СССР и ряда вузов г. Новосибирска (в том числе Сибстрина) был проведен большой цикл комплексных теоретических и экспериментальных исследований, а затем и натурных испытаний Красноярского судоподъемника. Разработанные в процессе этих исследований расчетные и экспериментальные методы нашли применение в теории судоходных сооружений речных гидроузлов, обосновании их габаритов, позволили дать предложения по принципиально новому подходу к увеличению пропускной способности шлюзов и обеспечению безопасности судопропуска.

В 1970 г. О.Ф. Васильев возглавил Отдел прикладной гидродинамики ИГиЛ СО АН СССР. Широкое признание в нашей стране и за рубежом получили выполненные в этом институте под его руководством работы по теории и численным методам решения задач о неустановившихся течениях в открытых руслах, каналах и речных системах. Признанием научных заслуг Олега Федоровича в области гидродинамики было избрание его в 1970 г. членом-корреспондентом АН СССР по специальности «Механика и процессы управления», а в 1994 г. — действительным членом Российской академии наук (академиком) по отделению «Океанологии, физики атмосферы и географии (экология)». С 1977 по 1980 г. О.Ф. Васильев работал заместителем директора и руководителем отдела «Природные ресурсы и окружающая среда» в Международном институте прикладного системного анализа (I IASA) в Австрии.

В 1985 г. О.Ф. Васильев был назначен директором-организатором, а в 1987 г. — директором Института водных и экологических проблем (ИВЭП) Сибирского отделения АН (г. Барнаул). Под его руководством новый академический институт активно включился в изучение экологических аспектов проблем водного хозяйства и гидроэнергетики Сибири.

Все свои творческие годы О.Ф. Васильев уделял большое внимание подготовке научных и инженерных кадров. В 1950-е гг. он преподавал в

МИСИ и МГМИ, в течение многих лет был профессором Новосибирского государственного университета и Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин), организовал и возглавил кафедру геоэкологии в Алтайском государственном университете. В настоящее время он возглавляет филиал кафедры НГАСУ (Сибстрин) в ИВЭП СО РАН. Среди его учеников 13 докторов и 38 кандидатов наук.

О.Ф. Васильев в течение многих лет был председателем Научных советов СО АН по проблемам окружающей среды и по проблеме перераспределения водных ресурсов Сибири, принимал участие в работе Научно-консультативного совета ЮНЕСКО по проблеме Аральского моря. Он является членом Научного совета РАН по водным проблемам, Комитета РАН по системному анализу. О.Ф. Васильев — почетный член Международной ассоциации по гидротехнике и гидравлическим исследованиям (МАГИ), почетный член Венгерского гидрологического общества и почетный доктор инженерных наук Университета Карлсруэ (ФРГ), член редакционных коллегий нескольких отечественных и зарубежных журналов. В настоящее время О.Ф. Васильев советник РАН.

По инициативе ученого в разные годы проводились важные научные конференции и совещания, такие как Международный симпозиум по стратифицированным течениям (1972), проведенные при поддержке НАТО симпозиумы «Региональный и глобальный круговорот ртути: источники, потоки и балансы» (1995), «Экстремальные гидрологические явления: новые концепции обеспечения безопасности» (2005).

Боевые и трудовые заслуги юбиляра отмечены орденом Отечественной войны 1-й степени, орденом «За заслуги перед Отечеством» 4-й степени, двумя орденами «Знак Почета», а также многими медалями, в том числе «За отвагу», «За оборону Москвы» и «За освобождение Белоруссии».

Редколлегия журнала «Известия вузов. Строительство», научная общественность, коллеги и ученики высоко чтут выдающиеся научные, педагогические, организационные и воинские заслуги Олега Федоровича и желают ему крепкого здоровья и дальнейших творческих успехов.

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА «АБВ СТРОЙТЕХНОЛОГИИ»

В НГАСУ (Сибстрин) разработана архитектурно-строительная система малоэтажного домостроения из пенобетонных легоблоков с использованием технологии механохимического активирования цементных вяжущих.

Предложенная система включает:

- **Проектирование зданий по этой системе основано на комплектах стандартных блоков — деталей, которые изготавливаются с применением универсальной бортоснастки со съемными элементами. Это позволяет получать большое разнообразие архитектурных элементов без усложнения технологии производства и увеличения парка форм.**
- **Формируются проектная документация и производственное задание на изготовление стеновых элементов.**
- **Технологическое оборудование для приготовления строительных смесей с использованием принципов механохимического активирования.**
- **Технологические регламенты производства материалов и конструкций с привязкой к местной сырьевой базе.**

Для производства строительных смесей используется комплекс оригинального оборудования: гидродинамический диспергатор (жидкостная кавитационная наноактивация) и дезинтегратор (сухое измельчение, смешивание и активация). При необходимости в схему может включаться бетоносмеситель.

При помощи данного оборудования может осуществляться изготовление стеновых и вспомогательных бетонных материалов, удовлетворяющих требованиям ГОСТ, на основе вяжущих, заполнителей и добавок, изготовленных частично или полностью на том же комплексе оборудования из разнообразного местного сырья.

Сырьем, помимо стандартного цемента, могут служить отходы промышленности (золы и шлаки, каменная пыль, отсевы, шламы, стоки, кубовые остатки и др.) или природные материалы (каменистые грунты, супеси, суглинки, пески, цеолиты, волластонит и др.).

Оборудование является компактным и малоэнергоемким. Комплекс может размещаться на площади 30 м^2 (без учета складов сырья и продукции) и работать от точки подключения не более 50 кВт.

РАЗРАБОТЧИКИ: В.И. Федченко, инж.,
Н.А. Машкин, д-р техн. наук, проф.,
В.С. Баев, канд. техн. наук, доц.

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
E-mail: ntio@:sibstrin.ru
Internet: www.sibstrin.ru
Тел./факс: (383) 266-28-89

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ В РЕДАКЦИЮ РУКОПИСЕЙ СТАТЕЙ

1. Содержание и структура статьи. К рассмотрению на предмет возможной публикации принимаются статьи:

— в которых приводятся результаты собственных научных (теоретических и/или экспериментальных) исследований авторов (кроме обзорных статей);
— содержащие четко определяемую научную новизну и соответствующие по своей тематике профилю и тематическим направлениям журнала;
— представляющие профессиональный научный интерес для читателей;
— верные по содержанию и выводам;
— не содержащие устаревших, неактуальных сведений;
— не являющиеся повторением или компиляцией ранее опубликованного.

Материалы научно-популярного, публицистического, учебно-методического и коммерческого характера не рассматриваются. Сведения о научно-технических разработках могут быть опубликованы, но не в качестве статьи, а как информация не рекламно-коммерческого характера, с оформлением по особым правилам (см. 9. ДОПОЛНЕНИЕ).

Статья должна быть структурирована, с выделением основных элементов (частей):

— название (должно строго соответствовать содержанию статьи);
— аннотация;
— ключевые слова;
— введение (введение и аннотация не должны дублировать друг друга), в котором должны быть отражены:
  • актуальность проблемы,
  • обзор состояния проблемы и оценка степени ее разработанности,
  • предмет и объект исследования,
  • цели и задачи;
— основной текст, в котором должны быть отражены:
  • методы исследования;
  • изложение решения научной задачи;
  • результаты;
  • обсуждение (значение, возможности использования, перспективы разработки проблемы);
— выводы/заключение (не должны повторять текст статьи и сформулированные ранее результаты; следует избегать фраз «выполнено решение», «проведены испытания» и т.п. описаний процесса решения задачи);
— подтверждения и благодарности (при наличии);
— библиографический список (не менее 8 источников, включая зарубежные, в том числе не более 1/3 ссылок на предыдущие работы авторов статьи; обязательны публикации за последние 5 лет);
— сведения о всех авторах статьи.

Указание наименований элементов статьи не обязательно, кроме «Ключевые слова» и «Библиографический список»; желательно выделять «Выводы» и/или «Заключение».

Название, аннотация и ключевые слова статьи должны обеспечивать эффективность ее поиска за счет информативности, привлекательности, краткости и ёмкости.

Основной текст статьи должен отвечать требованиям доказательности, четкости, конкретности, логичности, достаточности и краткости.

2. Представление рукописи статьи в редакцию журнала. Рукопись представляется в редакцию *на русском языке.* Зарубежные авторы могут присылать статьи *на английском языке*. Возможна публикация статьи одновременно в двух вариантах — на русском и английском языках. В этом случае оформляются два текста статьи — на русском языке и точный перевод на английский. Вместе с рукописью представляются:

— *сопроводительное письмо* руководства организации, откуда исходит рукопись;
— *рекомендация* соответствующего академического (кафедры) или научного подразделения (заверенная выписка из протокола заседания подразделения);

— *экспертное заключение* о возможности опубликования, оформленное в организации, откуда исходит рукопись;
— *разрешение* Роспатента на открытую публикацию материалов по заявке на изобретение.

Статья направляется в редакцию распечатанной *в двух экземплярах* на бумаге формата А4, с приложением ее записи на CD и вышеуказанных сопроводительных документов в одном экземпляре, по адресу: 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, редакция журнала «Известия высших учебных заведений. Строительство». Возможна отсылка электронной версии текста, иллюстраций и таблиц, а также сопроводительных документов в отсканированном виде по электронной почте на адрес редакции izvuz_str@sibstrin.ru.

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.

После принятия редакцией решения о соответствии представленной статьи профилю и тематическим разделам журнала, а также критериям, изложенным в п. 1, рукопись принимается к редакционной обработке, и с автором (авторами) заключается авторский договор, определяющий авторские права и согласие на публикацию персональных данных (минимально — e-mail).

Об отказе в рассмотрении статьи по формальным признакам авторы информируются редакцией по электронной почте с изложением причины отказа; комплект присланных документов авторам не возвращается. При представлении статьи в переработанном виде она рассматривается как вновь поступившая.

3. Оформление статьи. Рукопись должна готовиться на компьютере в редакторе Microsoft Word для Windows (версии от XP до Word 97/10). Текст набирают шрифтом Times New Roman Cyr размером 14 пт с межстрочным интервалом 1,5. Размер листа А4; поля: левое — 3 см, правое — 1,5 см, верхнее — 2 см, нижнее — 2,5 см. Обязательна нумерация страниц внизу посредине. Объём рукописи — до 12 с., включая иллюстрации, таблицы, библиографический список и сведения об авторах.

Состав рукописи статьи и правила оформления (см. «ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЬИ» http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/sample_of_article/):

♦ русскоязычная часть:
— индекс УДК — в левом верхнем углу, прописными буквами;
— инициалы, фамилии авторов — прописными буквами с выравниванием по левому краю, подряд через запятую для нескольких авторов;
— название статьи — прописными буквами с выравниванием по левому краю;
— аннотация объёмом до 0,3 с. текста (не менее 80 слов, с обозначением проблематики, методов, результатов исследования);
— ключевые слова (не менее 5, указывающие на принципиально важные объекты и научно-методические особенности исследования);
— текст статьи в соответствии со следующими правилами:
  • изложение — в общепринятом стиле научных публикаций, с соблюдением правил орфографии и пунктуации (авторская выверка текста обязательна);
  • следует применять физические величины и их обозначения согласно международной системе СИ;
  • аббревиатуры и сокращения расшифровываются при первом упоминании;
  • формулы следует набирать шрифтом Times New Roman в редакторе формул MS Equation или MathType, начинать с красной строки, располагать по центру и нумеровать арабскими цифрами в скобках у правого края страницы; ссылки на формулы в тексте — арабскими цифрами в круглых скобках;
  • в статье должен быть необходимый минимум формул; все второстепенные и промежуточные математические преобразования выносятся в приложение к статье (для рецензента);
  • русские и греческие буквы и индексы, а также цифры, аббревиатуры и стандартные функции (Re, cos и др.) в тексте, формулах, подписях к рисункам и в таблицах набираются прямым шрифтом; латинские буквы — 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 п, *I* и *J* и т.п. пояснения в необходимых случаях выполняются простым карандашом на полях;
- на полях рукописи указываются места рисунков и таблиц (вставлять их в текст не нужно — это делается при вёрстке);
- иллюстрации представляются в редакцию в виде файлов, созданных в Corel Draw или Microsoft Word, записанных с расширением cdr (предпочтительно) или doc., фотографии в TIFF или JPEG с разрешением 300dpi;
- иллюстрации, в том числе фотографии, должны иметь хорошую проработку деталей и должны быть выполнены так, чтобы их можно было отредактировать (изменить шрифт, исправить возможные орфографические ошибки);
- размер иллюстрации — не более 20x30 см, их общее число, как правило, не более 4;
- иллюстрации присылать в двух экземплярах, отдельно от статьи;
- подписи к рисункам присылать в двух экземплярах, отдельно от рисунков;
- таблицы печатаются каждая на отдельном листе; все наименования в них даются полностью, без сокращения слов; название таблицы размещается над таблицей;

— библиографический список, составляемый по следующим правилам:
- в список включаются *только опубликованные работы*, в порядке упоминания в статье; ссылки на них в тексте статьи даются арабскими цифрами в квадратных скобках;
- в списке не должно быть нормативных документов (ГОСТов, СНиПов, технических регламентов, правовых актов и т.п. неавторизованных источников) — ссылки на них даются в тексте статьи в развернутом виде или в форме подстрочных сносок;
- библиографические ссылки следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5-2008 (см. «ПРАВИЛА И ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ССЫЛОК» на сайте http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/rules_and_examples_of_design_bibilograficheskogo_list/);
- ссылки на интернет-сайты не допускаются;
- для статей из зарегистрированных *электронных журналов* указываются фамилии и инициалы авторов, название статьи, название журнала, выходные данные выпуска, адрес сайта журнала и дата обращения к электронному ресурсу;

— сведения об авторах: последовательно для каждого — фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень, звания (звания в негосударственных академиях наук и почётные звания не указывать), наименование учреждения, в котором работает автор, e-mail автора, страна (если не Российская Федерация);

♦ <u>англоязычная часть</u>:

— сведения об авторах — последовательно для каждого:
- фамилия, имя, отчество полностью, транслитерированные в латинские символы по системе BGN (использовать таблицу «ПРАВИЛА ТРАНСЛИТЕРАЦИИ» см. на сайте http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/BGN_PCGN_romanization/);
- ученая степень (DSc — доктор наук, PhD — кандидат наук, MSc — магистр, без указания научного направления);
- ученые звания (Professor, As. Professor, Academician of…, Cor. Member of… — профессор, доцент, академик …, член-корреспондент …), другое — Senior lecturer (ст. преподаватель), engineer (инженер), post-graduate student (аспирант), student (студент);
- официальное англоязычное название организации (учреждения), города (если не упоминается в названии организации), страны;

— название статьи;
— аннотация;
— ключевые слова (Keywords);
} перевод, идентичный русскому варианту;

— библиографический список (REFERENCES):
- для зарубежных источников на латинице — с сохранением оригинального описания;
- для ссылок на русскоязычные источники — транслитерированные с русских букв на латинские символы (по системе BGN) фамилии и инициалы всех авторов и название статьи; затем в квадратных скобках — название статьи в переводе на английский язык; остальные элементы библиографического описания на английском языке, с исключением разделителей /, — , // и заменой №, с. и С. соответственно на No., p. и pp.; в конце — (rus).

4. Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки).

5. Редакция имеет право на редакционную обработку статьи, в случае возникновения у редактора вопросов, просим присылать сотовый номер телефона одного из авторов (не для опубликования).

6. Корректура статьи может предоставляться по запросу автора.

7. Статьи, удовлетворяющие п. 1, направляются редакцией на рецензирование (подробно см. на сайте), причем рецензенты назначаются по усмотрению редакции.

8. Гонорар за опубликование статьи не выплачивается.

9. Д О П О Л Н Е Н И Е. Журнал публикует информацию о научно-технических разработках в области строительства. *Информационные материалы не являются статьями*, не рецензируются и при их оформлении следует придерживаться следующих правил:

— стиль должен быть информационно-описательным (не рекламно-коммерческим), в расчёте на интересы потенциального потребителя;

— приводятся сведения технического характера (возможны данные о технической и экономической эффективности), но без формул, ценовых и т.п. показателей;

— указываются разработчики, их контактные телефоны и адреса (почта, e-mail).

Объём представляемых материалов по одной разработке — до 1 с., включая возможные 1–2 иллюстрации хорошего качества. Электронная версия обязательна.

10. Подписка на журнал «Известия высших учебных заведений. Строительство» принимается с любого месяца без ограничения (заканчивается за два месяца до выхода журнала в свет) учреждениями агентства «Роспечать» и отделениями связи. Индекс издания 70377.

Отдельные экземпляры журнала можно приобрести в редакции по адресу: г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, НГАСУ (Сибстрин), к. 129.

О наличии необходимого номера можно узнать по телефону (383) 266 28 59 или по E-mail: izvuz_str @sibstrin.ru

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 раздел
В лабораториях вузов
Внедрение научных достижений в производство
Научная информация

На 2-е полугодие 2015 г.

каталожная цена за 6 месяцев — 3300 р.

цена отдельного номера — 550 р.

ISSN 0536–1052. Известия вузов. Строительство. 2015. № 8 (680). 1–120

ББК 38
И 33
УДК 69

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ СТАТЕЙ!

Введены новые правила подготовки рукописи для опубликования в нашем журнале, размещенные на обновленном сайте www. izvuzstr.sibstrin. ru

Научное издание

Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО
№ 8 (680) 2015
Научно-теоретический журнал

Редакторы *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*
Технический редактор *Н.М. Макаренко*
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*
Корректор *Г.И. Шведкина*