

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

СТРОИТЕЛЬСТВО

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

№ 1 (697)
Январь 2017 г.

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. Правдинец, 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 30.01.17. Формат 70×108 1/16
Усл. печ. л. 10,15+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 3820

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2017

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

Адищев В.В., Мальцев В.В. Применение нелинейных диаграмм деформирования бетона для расчета напряженно-деформированного состояния в железобетонной балке численно-аналитическим методом 5

Кользееев А.А. Влияние формы сечения на устойчивость сжатых сварных труб из двух уголков в составе трехпоясных ферм 18

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Селяев В.П., Седова А.А., Куприяшкина Л.И., Осинов А.К., Куприяшкина Е.И., Гарынкина Е.Н. Сравнительная характеристика влияния минеральных кислот на прочность цементного камня, наполненного цеолитодержащей породой 28

Ильина Л.В., Бердов Г.И., Гичко Н.О. Влияние комплексных дисперсных минеральных добавок на прочность цементного камня 38

Гусев К.П., Коротаева З.А., Полубояров В.А. Определение физико-механических характеристи-

стик огнеупорных строительных изделий на основе силикатного вяжущего материала и отходов керамики металлургического производства	45
Низина Т.А., Артамонов Д.А., Низин Д.Р., Чернов А.Н., Андронычев Д.О. Анализ влияния отвердителя на климатическую стойкость эпоксидных композиционных материалов	55
САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА	
Шиляев М.И., Хромова Е.М., Дорошкина А.А. Расчет многоступенчатой инерционно-конденсационно-абсорбционной пыле- и газоочистки промышленных выбросов в атмосферу. Часть 1. Универсальный метод расчета инерционных пылеуловителей и каскадов из них	65
СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ	
Малышева Ю.Э., Абраменков Д.Э., Дедов А.С., Малышев М.С., Абраменков Э.А. Классификационные признаки-элементы цилиндра-корпуса пневматических ударных механизмов	80
НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ	
Талапов В.В. Об общей схеме информационной модели объекта строительства	91
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Багоутдинова А.Г., Золотоносов Я.Д. Расчет и оценка эффективности змеевиковых теплообменников типа «труба в трубе» с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали	98
Зиганшин А.М., Беляева Е.Э., Соколов В.А. Снижение потерь давления при профилировании острого отвода и отвода с нишней	108

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE
OF RUSSIAN FEDERATION

INTERNATIONAL ASSOCIATION
OF CONSTRUCTION
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS

NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL
INSTITUTIONS

CONSTRUCTION

Scientific-theoretical journal
Published since March 1958
Monthly

No. 1 (697)
January 2017

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

Editorial Board:

A.A. Afanasyev, DSc (Eng), Prof., Corr. Mem. RAACS
V.A. Vorobiov, 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, Ass. 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

CONTENTS

BUILDING CONSTRUCTIONS

- Adishchev V.V., Mal'tsev V.V.** Application of nonlinear charts of deformation of concrete for calculation of the stress-strained state in the reinforced concrete beam by the numerical and analytical method 5
Kol'zeyev A.A. Influence of the form of section on the stability of compressed welded tubes from two angles in three-flange trusses 18

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

- Selyaev V.P., Sedova A.A., Kupriyashkina L.I., Osipov A.K., Kupriyashkina E.I., Garynkina E.N.** Comparative characteristics of the effect of mineral acids on the strength of cement stone, filled with the zeolite containing rock 28
Il'ina L.V., Berdov G.I., Gichko N.O. Influence of mineral complex disperse additions to the strength of cement stone 38

- Gusev K.P., Korotaeva Z.A., Poluboyarov V.A.** Determination of physical and mechanical characteristics of fireproof construction products on the basis of a

silicate binder and ceramic metallurgical wastes	45
Nizina T.A., Artamonov D.A., Nizin D.R., Chernov A.N., Andronychev D.O.	
Analysis of hardener influence on climatic resistance of epoxy composite materials	55
SANITARY ENGINEERING	
Shilyaev M.I., Khromova E.M., Doroshkina A.A. Calculation of multi-stage inertial-condensation-absorption of dust and gas purification of industrial emissions into the atmosphere. Part 1. A universal method for calculating inertial dust traps and cascades of them	65
BUILDING AND ROAD MACHINES	
Malysheva Yu.E., Abramenkov D.E., Dedov A.S., Malyshev M.S., Abramenkov E.A. Classification features elements cylinder-body pneumatic hammer mechanism	80
SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY	
Talapov V.V. About the general scheme of the information model of construction object	91
SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION	
Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ya.D. Calculation and evaluation of the efficiency of coil heat exchangers type «pipe in pipe» with a varying bending radius helical spiral	98
Ziganshin A.M., Belyaeva E.E., Sokolov V.A. Pressure losses reduction with profiling of sharp elbow and elbow with dead-end	108

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ



УДК 624.012.45

В.В. АДИЩЕВ, В.В. МАЛЬЦЕВ

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА ДЛЯ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ БАЛКЕ ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ*

Применяется разработанный ранее численно-аналитический метод определения прогибов железобетонной балки с помощью нелинейных диаграмм деформирования бетона. Метод основан на едином подходе к построению аппроксимаций диаграмм деформирования бетона и арматуры, аппроксимаций функции кривизны, функции распределения высоты сжатой зоны. В настоящей работе рассмотрены диаграммы деформирования бетона, рекомендованные СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции», а именно двух-, трехлинейная диаграммы и криволинейная диаграмма Н.И. Карпенко. Сравнение показало, что при определении изгибающего момента в состоянии предразрушения полученные результаты для всех аппроксимаций мало отличаются, кроме малоармированных балок. Однако при вычислении прогибов расхождение достигает 20 %.

Ключевые слова: численно-аналитический метод, физическая нелинейность, диаграмма деформирования, прогиб, железобетон.

1. Введение. Данная работа является продолжением статьи [1], в которой предлагается численно-аналитический метод определения прогибов железобетонного элемента. При реализации данного метода был использован единый подход к построению аппроксимаций диаграмм деформирования бетона и арматуры, а также аппроксимаций функции кривизны, высоты сжатой зоны и прогиба в зависимости от координаты по длине балки. В частности, диаграмма растяжения – сжатия бетона (см. рис. 3 работы [1]) аппроксимируется на участках 1–6 сплайн-функциями:

участок 1–2

$$\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_2 + b_2(\varepsilon_2 - \varepsilon)^{m_2};$$

участок 2–3

$$\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_3 + E_b(\varepsilon - \varepsilon_3) + b_3(\varepsilon_3 - \varepsilon)^{m_3};$$

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-08-0097516).

участок 3–4

$$\sigma_b(\varepsilon) = E_b \varepsilon;$$

участок 4–5

$$\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_4 + E_b(\varepsilon - \varepsilon_4) + b_4(\varepsilon - \varepsilon_4)^{m_4};$$

участок 5–6

$$\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_5 + b_5(\varepsilon - \varepsilon_5)^{m_5},$$

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.

СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции» рекомендует использовать в расчетах диаграмму двухлинейную (Прандтля) или трехлинейную (рис. 1), а также криволинейную диаграмму Н.И. Карпенко (рис. 2) [2–4].

Деформирование растянутого бетона определяется по диаграммам, представленным на рис. 1, при этом расчетное сопротивление бетона сжатию R_b заменяют на расчетное сопротивление бетона растяжению R_{bt} .

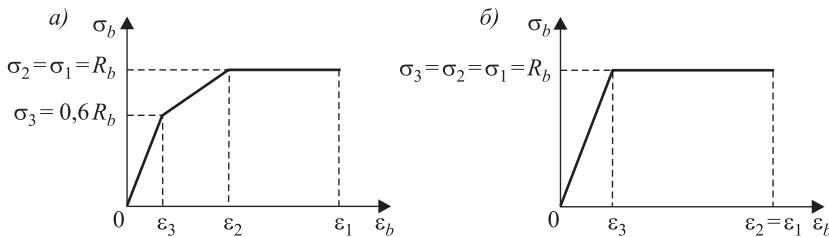


Рис. 1. Диаграмма деформирования сжатого бетона 1–0

а – трехлинейная; б – двухлинейная (Прандтля)

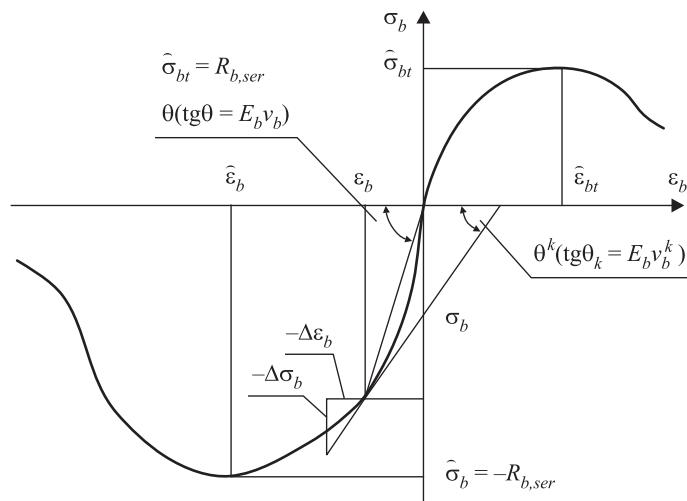


Рис. 2. Криволинейная диаграмма деформирования бетона (Н.И. Карпенко)

Аналитическая зависимость криволинейных диаграмм деформирования бетона (Н.И. Карпенко) принимается в виде:

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_m}{E_m v_m}, \quad d\varepsilon_m = \frac{d\sigma_m}{E_m v_m^k},$$

где ε_m , σ_m , E_m – деформации, напряжения, начальный модуль упругости; m – индекс материала (для сжатой зоны бетона $m = b$, для растянутой $m = bt$); v_m – коэффициент изменения секущего модуля, определяемый в соответствии с СП 63.13330.2012 (Приложение Г).

2. Реализация численно-аналитического метода с применением различных диаграмм деформирования бетона. Рассмотрим железобетонную балку прямоугольного сечения шириной b и высотой h , армированную одним семейством арматуры площадью A_s (см. рис. 1 в работе [1]).

Уравнения равновесия относительно нейтральной линии ($y = 0$) до момента образования трещины имеют следующий вид [5]:

$$\begin{cases} b \left(-\frac{x}{\varepsilon_b} \right)^{\varepsilon_{bt}} \int_{\varepsilon_b}^{\varepsilon_{bt}} \psi(\varepsilon) d\varepsilon + \sigma_s A_s = 0, \\ b \left(-\frac{x}{\varepsilon_b} \right)^2 \int_{\varepsilon_b}^{\varepsilon_{bt}} \psi(\varepsilon) \varepsilon d\varepsilon + \sigma_s A_s (h_0 - x) = M, \\ \varepsilon_b = \frac{x}{x - h_0} \varepsilon_s, \\ \varepsilon_{bt} = \frac{h - x}{h_0 - x} \varepsilon_s, \end{cases} \quad (1)$$

где $\psi(\varepsilon)$ – функция, аппроксимирующая диаграмму деформирования бетона;
 σ_s – напряжение в слое арматуры;
 x – высота сжатой зоны сечения;
 h_0 – полезная высота сечения балки;
 ε_b – деформация крайнего сжатого волокна сечения;
 ε_{bt} – деформация крайнего растянутого волокна сечения;
 ε_s – деформация растяжения арматуры;
 M – действующий в сечении изгибающий момент.

Перепишем уравнения равновесия (1) в безразмерном виде:

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

где $\xi = x/h_0$ – относительная высота сжатой зоны; $H = h/h_0$;

$\mu_s = A_s / (bh_0)$ – коэффициент армирования сечения;
 $\bar{\phi}(\varepsilon_s) = \phi(\varepsilon_s) / \sigma_{02}$; $\bar{\psi}(\varepsilon) = \psi(\varepsilon) / \sigma_{02}$; $\bar{M} = M / (bh_0^2 \sigma_{02})$.

Функция $\sigma_s = \phi(\varepsilon_s)$ аппроксимирует диаграмму деформирования арматуры. Для обезразмеривания выбирается любое удобное значение напряжения, например, σ_{02} – напряжение, соответствующее остаточной деформации 0,2 % для арматуры.

В соответствии с алгоритмом численно-аналитического метода расчета [1], выбираются узловые значения $\varepsilon_{bt,i}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) в интервале $0 < \varepsilon_{bt,i} < \varepsilon_{bt}^{crc}$, где $\varepsilon_{bt}^{crc} = \varepsilon_6$ – предельная деформация растяжения бетона согласно реальной диаграмме деформирования бетона (см. рис. 3 в работе [1]). По СП 63.13330.2012 определяем расчетное сопротивление бетона сжатию $R_b = \sigma_2$ и растяжению $R_{bt} = \sigma_5$, округляя полученные значения по меньшему классу бетона. Данные сопротивления соответствуют напряжениям $R_b = \sigma_1 = \sigma_2$, $R_{bt} = \sigma_5 = \sigma_6$ для трехлинейной диаграммы (рис. 1, *a*) и $R_b = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, $R_{bt} = \sigma_4 = \sigma_5 = \sigma_6$ для двухлинейной диаграммы (рис. 1, *б*). Максимальные напряжения на линейно-упругом участке трехлинейных диаграмм вычисляются по формуле $\sigma_3 = 0,6R_b$, $\sigma_4 = 0,6R_{bt}$. Деформации на участках 3–0 и 0–4 определяются из закона Гука $\varepsilon_3 = \sigma_3/E_3$ и $\varepsilon_4 = \sigma_4/E_4$ соответственно для всех видов диаграмм. Для трехлинейной диаграммы деформации ε_2 и ε_5 находятся графическим путем, наложением трехлинейной и реальной диаграммы с последующим определением точки пересечения. Деформации, соответствующие первой и шестой узловым точкам, определяются из условия равенства удельной энергии разрушения двухлинейной $\bar{U}_{2,b}$, $\bar{U}_{2,bt}$ и трехлинейной $\bar{U}_{3,b}$, $\bar{U}_{3,bt}$ диаграмм в выбранном сечении удельной энергии разрушения диаграммы, аппроксимируемой сплайн-функцией \bar{U}_b , \bar{U}_{bt} в том же сечении, отдельно для сжатого 1–0 и растянутого 0–6 участков:

$$\begin{cases} \bar{U}_b = \bar{U}_{2,b} = \bar{U}_{3,b} = \int\limits_{\varepsilon_1}^0 \bar{\psi}(\varepsilon) d\varepsilon, \\ \bar{U}_{bt} = \bar{U}_{2,bt} = \bar{U}_{3,bt} = \int\limits_0^{\varepsilon_6} \bar{\psi}(\varepsilon) d\varepsilon, \end{cases} \quad (3)$$

где \bar{U}_b , \bar{U}_{bt} – удельная энергия разрушения на участке сжатого 1–0 и растянутого 0–6 бетона соответственно;

$$\bar{U}_b = U_b / \sigma_{02}; \quad \bar{U}_{bt} = U_{bt} / \sigma_{02}; \quad \bar{U}_{1,b} = U_{1,b} / \sigma_{02}; \quad \bar{U}_{1,bt} = U_{1,bt} / \sigma_{02}; \quad \bar{U}_{2,b} = U_{2,b} / \sigma_{02}; \quad \bar{U}_{2,bt} = U_{2,bt} / \sigma_{02}.$$

Удельные энергии разрушения определяются как площади подграфиков аппроксимирующих кривых [6].

Таким образом, для каждого узлового значения деформаций растяжения бетона получаем систему уравнений (2), состоящую из четырех уравнений с четырьмя неизвестными $\varepsilon_{b,i}$, $\varepsilon_{s,i}$, ζ_i , \bar{M}_i для двух- и трехлинейных диаграмм. Далее, если известна функция $\bar{M}(\zeta)$, описывающая изменение изгибающего момента по длине балки, определяются изначально неизвестные координаты сечений ζ_i из уравнений

$$\bar{M}(\zeta_i) = \bar{M}_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

И наконец, находим перемещение сечения с координатой ζ_i по известной формуле Мора

$$\bar{\Delta}(\zeta_i) = \int_0^L \bar{M}_{01}(\zeta) \bar{\chi}(\zeta) d\zeta, \quad (5)$$

где $\zeta = z/h_0$, z – координата по длине балки;

$L = l/h_0$, l – длина балки, $\bar{\Delta}(\zeta_i) = \Delta(z_i)/h_0$, $\bar{M}_{01}(\zeta) = M_{01}(z)/(bh_0^2\sigma_{02})$,

$M_{01}(z)$ – распределение по длине балки изгибающего момента, возникающего при действии единичной силы, приложенной по направлению искомого перемещения (в сечении с координатой z_i);

$\bar{\chi}(\zeta) = -\varepsilon_b(\zeta)/\xi(\zeta)$ – распределение по длине балки кривизны нейтральной линии.

3. Пример использования различных диаграмм деформирования бетона в численно-аналитическом методе. Ниже приведены результаты расчета напряженно-деформированного состояния с применением сплайн-аппроксимаций, двух- и трехлинейных аппроксимаций, а также аппроксимаций Н.И. Карпенко.

В качестве примера применения предложенного в [1] численно-аналитического метода рассмотрим задачу об изгибе однопролетной шарнирно опертой балки длиной l , нагруженной равномерно распределенной нагрузкой q .

Геометрические характеристики балки: $h = 0,4$ м – высота поперечного сечения; $h_0 = 0,37$ м – полезная высота поперечного сечения; $b = 0,2$ м – ширина поперечного сечения; $l = 4$ м – длина пролета. Материал балки железобетон: условный класс бетона В20 ($R_b = 11,5$ МПа, $R_{bt} = 0,9$ МПа); класс арматурной стали А400. Коэффициент армирования μ_s варьируется ($\mu_s = 0,001; 0,005; 0,01$). Армирование балки выполнено в соответствии со схемой, представленной на рис. 1 в работе [1].

Диаграмма растяжения стали А400 не приводится, так как при образовании трещины деформации арматуры соответствуют линейно-упругому закону: $\sigma_s = E_s \varepsilon_s$, модуль упругости стали $E_s = 200\,000$ МПа, $\sigma_{02} = 460$ МПа.

Способом аппроксимации диаграмм деформирования бетона посвящено значительное количество публикаций [7–11]. В рассматриваемом примере трехлинейная (рис. 1, a) диаграмма растяжения – сжатия бетона аппроксимируется на участках 1–6 следующими линейными функциями:

участок 1–2

$$\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_2 + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} (\varepsilon - \varepsilon_2);$$

участок 2–3

$$\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_3 + \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\varepsilon_2 - \varepsilon_3} (\varepsilon - \varepsilon_3);$$

участок 3–4

$$\sigma_b(\varepsilon) = E_b \varepsilon;$$

участок 4–5

$$\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_4 + \frac{\sigma_5 - \sigma_4}{\varepsilon_5 - \varepsilon_4} (\varepsilon - \varepsilon_4);$$

участок 5–6

$$\sigma_b(\varepsilon) = \sigma_5 + \frac{\sigma_6 - \sigma_5}{\varepsilon_6 - \varepsilon_5} (\varepsilon - \varepsilon_5).$$

Двухлинейная диаграмма деформирования (рис. 1, б) аппроксимируется по аналогии с трехлинейной на участках 2–5, так как $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ и $\varepsilon_5 = \varepsilon_6$.

Удельные энергии разрушения определяются в соответствии со сплайн-аппроксимацией диаграммы на участках 1–0 и 0–6:

$$\begin{cases} \bar{U}_b = \int_{\varepsilon_1}^0 \bar{\psi}(\varepsilon) d\varepsilon = 1,232 \cdot 10^{-4}, \\ \bar{U}_{bt} = \int_0^{\varepsilon_6} \bar{\psi}(\varepsilon) d\varepsilon = 6,522 \cdot 10^{-7}. \end{cases}$$

По принятой гипотезе равенства удельных энергий при сжатии $\bar{U}_b = \bar{U}_{2,b} = \bar{U}_{3,b}$ и растяжении $\bar{U}_{bt} = \bar{U}_{2,bt} = \bar{U}_{3,bt}$ определяются узловые деформации $\varepsilon_1, \varepsilon_6$ для двух- и трехлинейной диаграмм.

Табл. 1 содержит координаты узлов аппроксимации для построения сплайн-аппроксимации, трех- и двухлинейной диаграмм деформирования бетона, а также характерных точек для построения диаграммы Н.И. Карпенко для бетона условного класса В20.

Таблица 1. Узлы аппроксимации для построения диаграммы бетона

Координата узла	Узел					
	1	2	3	4	5	6
<i>Сплайн-аппроксимация диаграммы</i>						
$\sigma, \text{МПа}$	-5,70	-15,00	-5,70	0,82	1,35	0,80
$\varepsilon, \text{м/м}$	$-4,80 \cdot 10^{-3}$	$-2,50 \cdot 10^{-3}$	$-0,20 \cdot 10^{-3}$	$0,03 \cdot 10^{-3}$	$0,20 \cdot 10^{-3}$	$0,27 \cdot 10^{-3}$
<i>Трехлинейная диаграмма</i>						
$\sigma, \text{МПа}$	-11,50	-11,50	-6,90	0,54	0,90	0,90
$\varepsilon, \text{м/м}$	$-5,23 \cdot 10^{-3}$	$-0,88 \cdot 10^{-3}$	$-0,24 \cdot 10^{-3}$	$0,02 \cdot 10^{-3}$	$0,07 \cdot 10^{-3}$	$0,33 \cdot 10^{-3}$
<i>Двухлинейная диаграмма (Прандтля)</i>						
$\sigma, \text{МПа}$	-	-11,50	-11,50	0,90	0,90	-
$\varepsilon, \text{м/м}$	-	$-5,13 \cdot 10^{-3}$	$-0,40 \cdot 10^{-3}$	$0,03 \cdot 10^{-3}$	$0,35 \cdot 10^{-3}$	-
<i>Криволинейная диаграмма Н.И. Карпенко</i>						
$\sigma, \text{МПа}$	-12,69	-15,00	-5,70	0,82	1,35	1,27
$\varepsilon, \text{м/м}$	$-4,44 \cdot 10^{-3}$	$-2,50 \cdot 10^{-3}$	$-0,26 \cdot 10^{-3}$	$0,045 \cdot 10^{-3}$	$0,20 \cdot 10^{-3}$	$0,27 \cdot 10^{-3}$

Наиболее интересно определение напряженно-деформированного состояния перед образованием трещины. Для разрушающего сечения принимаем $\varepsilon_{bt} = \varepsilon_{bt}^{crc} = \varepsilon_6$ согласно диаграмме деформирования бетона. Четыре неизвестные $\varepsilon_b, \varepsilon_s, \xi, \bar{M}$ определяются как решение системы уравнений (2), где \bar{M} в соответствии с выдвинутой гипотезой можно считать моментом трещинообразования, $\bar{M} = \bar{M}_{crc}$.

Зависимость изгибающего момента от координаты по длине шарнирно опертой балки описывается известной формулой

$$\bar{M}(\zeta) = \frac{\bar{q}\zeta^2}{2} - \frac{\bar{q}\zeta L}{2}, \quad (6)$$

где относительная нагрузка $\bar{q} = q / (b\sigma_{02})$.

Для шарнирно опертой балки под действием равномерно распределенной нагрузки трещина может образоваться в сечении с координатой $\zeta = L/2$ при нагрузке, определяемой из соотношения $\bar{M}_{crc} = \bar{q}_{crc}L^2/8$.

Из уравнений (4) и (6) определяется относительная координата ζ_i сечений, в которых изгибающий момент равен \bar{M}_i ($i = 1, 2, \dots, 8$). Затем находятся относительные величины прогибов в узловых точках по формуле (5). В табл. 2 представлены результаты расчета разрушающего сечения, выполненные в программном комплексе Mathcad 15, при использовании различных нелинейных диаграмм деформирования бетона и варьировании коэффициента армирования μ_s .

Таблица 2. Результаты расчета НДС разрушающего сечения в состоянии предразрушения при различных нелинейных диаграммах деформирования бетона

Вид диаграммы	Безразмерные физические величины							
	$\frac{\varepsilon_b \cdot 10^4}{\psi(\varepsilon_b) \cdot 10^3}$	$\frac{\varepsilon_{bt} \cdot 10^4}{\psi(\varepsilon_{bt}) \cdot 10^3}$	$\frac{\varepsilon_s \cdot 10^4}{\phi(\varepsilon_s)}$	ξ	$\bar{\chi} \cdot 10^4$	$\bar{M} \cdot 10^3$	$\bar{q} \cdot 10^5$	$\bar{\Delta}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Коэффициент армирования $\mu_s = 0,001$								
Сплайн	-1,493 -9,25	2,70 1,739	2,385 0,104	0,385	3,879	1,157	7,92	0,025
Трехлинейная	-1,443 -8,94	3,27 1,957	2,917 0,127	0,331	4,360	0,957	6,55	0,028
Двухлинейная	-1,518 -9,39	3,50 1,957	3,124 0,136	0,327	4,641	0,981	6,71	0,029
Н.И. Карпенко	-1,697 -8,13	2,70 2,750	2,372 0,103	0,417	4,069	1,136	7,78	0,029
Коэффициент армирования $\mu_s = 0,005$								
Сплайн	-1,663 -10,01	2,70 1,739	2,373 0,103	0,412	4,035	1,473	10,08	0,029
Трехлинейная	-1,688 -10,00	3,27 1,957	2,898 0,126	0,368	4,586	1,363	9,33	0,034
Двухлинейная	-1,784 -10,59	3,50 1,957	3,104 0,135	0,365	4,888	1,419	9,71	0,036
Н.И. Карпенко	-1,905 -9,13	2,70 2,750	2,356 0,102	0,447	4,261	1,443	9,88	0,033
Коэффициент армирования $\mu_s = 0,01$								
Сплайн	-1,875 -12,00	2,70 1,739	2,357 0,102	0,443	4,231	1,864	12,76	0,032

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Трехлинейная	$\frac{-1,967}{-11,59}$	$\frac{3,27}{1,957}$	$\frac{2,877}{0,125}$	0,406	4,844	1,855	12,70	0,038
Двухлинейная	$\frac{-2,080}{-13,00}$	$\frac{3,50}{1,957}$	$\frac{3,081}{0,134}$	0,403	5,162	1,946	13,32	0,040
Н.И. Карпенко	$\frac{-2,150}{-10,00}$	$\frac{2,70}{2,750}$	$\frac{2,338}{0,102}$	0,479	4,488	1,815	12,42	0,035

На рис. 3, а приведены распределения относительных высот сжатой зоны ξ для различных диаграмм деформирования. Графики высот сжатой зоны на приопорных участках накладываются друг на друга при расчете с применением сплайнов, двух- и трехлинейной диаграмм. При этом при использовании диаграммы Н.И. Карпенко значение высоты сжатой зоны на приопорном участке ниже, чем при использовании диаграммы, описанной сплайн-функциями, на $\sim 4\%$ для $\mu_s = 0,001; 0,005; 0,01$. Это объясняется тем, что на

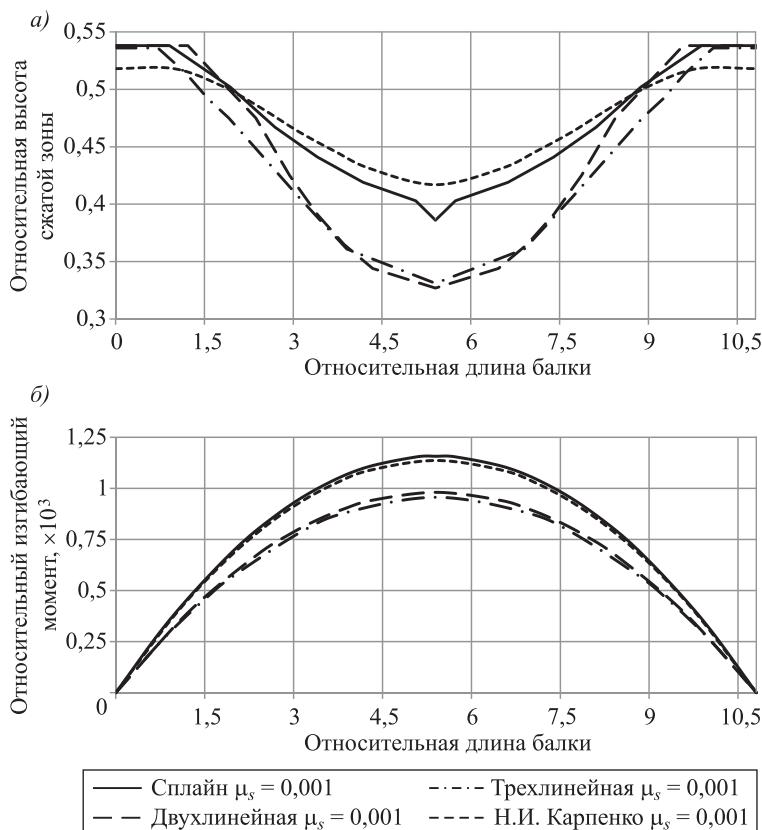


Рис. 3. Влияние различных диаграмм деформирования на распределение
а – относительных высот сжатой зоны; б – относительных изгибающих
моментов

а – относительных высот сжатой зоны; б – относительных изгибающих
моментов

диаграмме Н.И. Карпенко отсутствует участок линейно-упругого деформирования.

Графики высот сжатой зоны, построенные с использованием двух- и трехлинейной диаграммы деформирования, практически накладываются друг на друга в окрестности опасного (разрушающего) сечения (см. рис. 3, а). Погрешность использования двух- и трехлинейных диаграмм при определении высоты сжатой зоны по сравнению с диаграммой, аппроксимированной сплайн-функциями, составляет $\sim 15\%$ для $\mu_s = 0,001$, $\sim 12\%$ для $\mu_s = 0,005$ и $\sim 9\%$ для $\mu_s = 0,01$. Распределение высоты сжатой зоны для диаграммы Н.И. Карпенко дает более близкие значения по сравнению с распределением, полученным при помощи сплайнов, погрешность в окрестности опасного сечения составляет $\sim 8\%$ для $\mu_s = 0,001; 0,005; 0,01$.

На рисунке 3, б приведены распределения относительных моментов. Близкие результаты получаются для двух- и трехлинейной диаграмм, аналогичная ситуация наблюдается для диаграмм Н.И. Карпенко и сплайнов. Погрешность определения изгибающего момента по двух- и трехлинейной диаграммам составляет $\sim 18\%$ для $\mu_s = 0,001$, $\sim 8\%$ для $\mu_s = 0,005$ и $\sim 4\%$ для $\mu_s = 0,01$ по сравнению с моментами, определенными с использованием сплайн-аппроксимации.

На рис. 4 представлены распределения относительных кривизн $\bar{\chi}$ по длине балки при различных значениях коэффициента армирования μ_s . Характерно резкое увеличение кривизны на участке в середине балки, при использовании диаграммы деформирования, описанной сплайн-функциями ($\mu_s = 0,001$). На этом участке деформации растяжения крайнего нижнего волокна попадают на ниспадающую ветвь диаграммы деформирования бетона: $\varepsilon_5 < \varepsilon_{bt} < \varepsilon_6$. При увеличении коэффициента армирования ($\mu_s = 0,005$) данный эффект исчезает. Наибольшее отличие результатов расчетов при использовании двухлинейной диаграммы от результатов, полученных при помощи сплайн-аппроксимации, составляет $\sim 17\%$ для $\mu_s = 0,001$, $\sim 18\%$ для $\mu_s = 0,005$ и $\sim 19\%$ для $\mu_s = 0,01$.

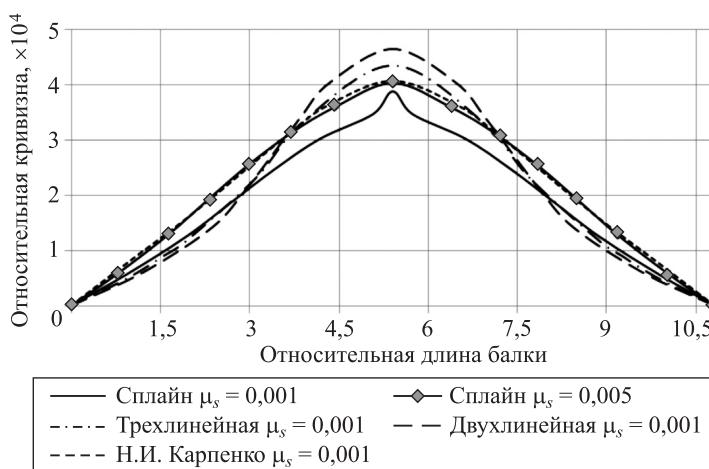


Рис. 4. Распределения относительных кривизн для различных диаграмм деформирования

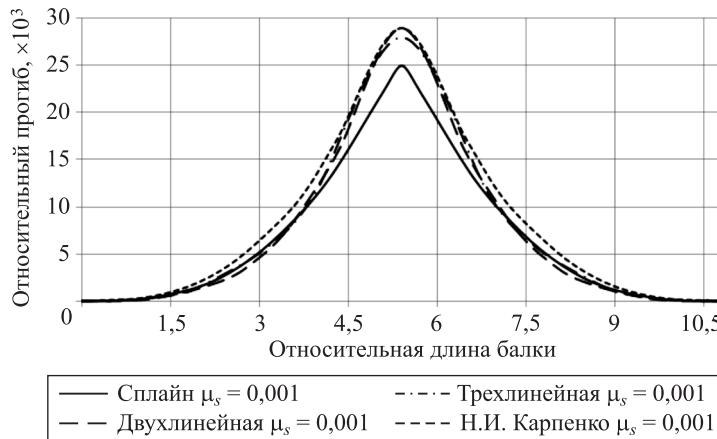


Рис. 5. Распределения относительных прогибов для различных диаграмм деформирования

Распределения относительных прогибов $\bar{\Delta}$ по длине балки при различных значениях коэффициента армирования μ_s показаны на рис. 5. По результатам расчетов (см. табл. 2) большему коэффициенту армирования соответствует большее значение максимальных прогибов. Этот факт объясняется тем, что при увеличении коэффициента армирования увеличивается изгибающий момент, соответствующий образованию трещины.

Результаты расчета прогибов, полученные по диаграммам деформирования Н.И. Карпенко, двух- и трехлинейной диаграмм, дают близкие значения, что превышает значения прогиба, найденные по сплайн диаграмме, на $\sim 14\%$ для $\mu_s = 0,001$, $\sim 20\%$ для $\mu_s = 0,005$ и $\sim 20\%$ для $\mu_s = 0,01$.

Выводы. На припорных участках балки сплайн-аппроксимация, двух- и трехлинейная аппроксимации дают практически одинаковые результаты при определении высоты сжатой зоны. Отличие от этих результатов для аппроксимации диаграммы Н.И. Карпенко составляет $\sim 4\%$.

В окрестности центрального разрушающего сечения погрешность при вычислении высоты сжатой зоны для двух- и трехлинейной аппроксимаций по сравнению со сплайн-аппроксимацией составляет от 9 до 15 % (в сторону занижения). Аппроксимация Н.И. Карпенко завышает значение высоты сжатой зоны на $\sim 8\%$.

Результаты расчета распределений изгибающего момента в состоянии предразрушения показывают, что сплайн-аппроксимация и аппроксимация Н.И. Карпенко дают практически совпадающие результаты. Применение двух- и трехлинейной аппроксимации при достаточно высоком проценте армирования дает незначительную погрешность по сравнению со сплайн-аппроксимацией. Для малоармированных балок двух- и трехлинейная аппроксимации занижают значение изгибающего момента до $\sim 20\%$.

Наибольшие погрешности от 17 до 19 % по сравнению со сплайн-аппроксимацией при определении кривизны получены для двухлинейной аппроксимации диаграммы бетона.

Результаты расчетов с применением аппроксимаций Н.И. Карпенко, двух- и трехлинейной показали завышение прогибов на 14–20 % по сравнению со сплайн-аппроксимацией.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адищев В.В., Мальцев В.В. Численно-аналитический метод определения прогибов железобетонной балки с применением реальной нелинейной диаграммы деформирования бетона // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 9. С. 5–17.
2. Карпенко Н.И. К построению обобщенной зависимости для диаграмм деформирования бетона // Строительные конструкции. Минск, 1983. С. 164–173.
3. Карпенко Н.И., Карпенко С.Н. О диаграммном методе построения физических соотношений для бетонных и железобетонных элементов при объемном напряженном состоянии // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. 2016. № 4 (364). С. 28–34.
4. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. Анализ и совершенствование криволинейных диаграмм деформирования бетона для расчета железобетонных конструкций по деформационной модели // Пром. и гражд. стр-во. 2013. № 1. С. 28–30.
5. Адищев В.В., Шмаков Д.С. Определение момента образования трещины как нечеткой величины по экспериментальным данным // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 5. С. 3–13.
6. Митасов В.М., Адищев В.В. Основные положения энергетической теории сопротивления железобетона // Изв. вузов. Строительство. 2010. № 6. С. 3–7.
7. Митасов В.М., Адищев В.В., Федоров Д.А. Развитие теории сопротивления железобетона // Промышленность строительных материалов. Сер. 3. Промышленность сборного железобетона: аналит. обзор. 1990. Вып. 4. 45 с.
8. Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошинченко В.Л. Методы сплайн-функций. М.: Наука, 1980. 352 с.
9. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. К расчету прочности, жесткости и трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели // Изв. Казан. гос. архитектурно-строит. ун-та. 2013. № 4 (26). С. 113–120.
10. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. К определению деформаций изгибаемых железобетонных элементов с использованием диаграмм деформирования бетона и арматуры // Строительство и реконструкция. 2012. № 2. С. 11–19.
11. Карпенко Н.И., Радайкин О.В. К совершенствованию диаграмм деформирования бетона для определения момента трещинообразования и разрушающего момента в изгибаемых железобетонных элементах // Строительство и реконструкция. 2012. № 3. С. 10–16.

Адищев Владимир Васильевич, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
Мальцев Виктор Васильевич, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 23.12.16

Adishchev Vladimir Vasil'evich, DSc, Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Mal'tsev Viktor Vasil'evich, Post-graduate Student

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

APPLICATION OF NONLINEAR CHARTS OF DEFORMATION OF CONCRETE FOR CALCULATION OF THE STRESS-STRAINED STATE IN THE REINFORCED CONCRETE BEAM BY THE NUMERICAL AND ANALYTICAL METHOD

Previously developed numerical-analytical method for determining the deflection of reinforced concrete beams with concrete nonlinear deformation diagrams is used. The method is based on a single approach to the construction of approximations of

deformation diagrams of concrete and reinforcement, by means of approximations of the curvature function, the distribution function the height of the compressed zone. In this paper, the charts of deformation of concrete were reviewed, recommended SP 63.13330.2012 «Concrete and reinforced concrete structures», namely the two-line, three-line chart and chart curved N.I. Karpenko. The comparison showed that the determination of the bending moment in a position to of prefracture results for all approximations differ little, except for small reinforced beams. However, when calculating the deflections of divergence is 20 %.

K e y w o r d s: numerically-analytical method, the physical nonlinearity, charts of deformation, deflection, reinforced.

REFERENCES

1. A d i s h c h e v V.V., M a l ’ t s e v V.V. Chislenno-analiticheskiy metod opredeleniya progibov zhelezobetonnoy balki s primeniem real’noy nelineynoy diagrammy deformirovaniya betona [The numerical-analytical method for determining the deflection of reinforced concrete beams with use real nonlinear stress-strain charts of concrete]. Izvestiya vuzov. Stroitel’stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 9. Pp. 5–17. (in Russian)
2. K a r p e n k o N.I. K postroeniyu obobshchennoy zavisimosti dlya diagramm deformirovaniya betona [Construction of generalized dependence for concrete deformation diagrams]. Stroitel’nye konstruktsii [Building construction]. Minsk, 1983. Pp. 164–173. (in Russian)
3. K a r p e n k o N.I., K a r p e n k o S.N. O diagrammnom metode postroeniya fizicheskikh sootnosheniy dlya betonnykh i zhelezobetonnykh elementov pri ob”emnom napryazhennom sostoyanii [About diagram method for construction of the physical proportions for concrete and reinforced concrete elements under volumetric (triaxial) stress state]. Izvestiya vuzov. Tekhnologiya tekstil’noy promyshlennosti [News of Higher Educational Institutions. Technology textile industry]. 2016. No. 4 (364). Pp. 28–34. (in Russian)
4. K a r p e n k o N.I., S o k o l o v B.S., R a d a y k i n O.V. Analiz i sovershenstvovanie krivolineynykh diagramm deformirovaniya betona dlya rascheta zhelezobetonnykh konstruktsiy po deformatsionnoy modeli [Analysis and enhancement of curvilinear diagrams of concrete deformations for calculation of reinforced concrete structures on the basis of a deformation model]. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel’stvo [Industrial and Civil Engineering]. 2013. No. 1. Pp. 28–30. (in Russian)
5. A d i s h c h e v V.V., S h m a k o v D.S. Opredelenie momenta obrazovaniya treshchiny kak nechetkoy velichiny po eksperimental’nym dannym [Determination of moment of process of cracking such as fuzzy value by experimental data]. Izvestiya vuzov. Stroitel’stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2012. No. 5. Pp. 3–13. (in Russian)
6. M i t a s o v V.M., A d i s h c h e v V.V. Osnovnye polozheniya energeticheskoy teorii soprotivleniya zhelezobetona [Main regulations of energy theory of reinforced concrete strength]. Izvestiya vuzov. Stroitel’stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2010. No. 6. Pp. 3–7. (in Russian)
7. M i t a s o v V.M., A d i s h c h e v V.V., F e d o r o v D.A. Razvitiye teorii soprotivleniya zhelezobetona [Development of the theory of resistance of reinforced concrete]. Promyshlennost’ stroitel’nykh materialov. Seriya 3. Promyshlennost’ sbornogo zhelezobetona: analiticheskiy obzor [Building materials industry. Series 3. Industry precast concrete. Analytical Review]. 1990. Vol. 4. 45 p. (in Russian)
8. Z a v ’ y a l o v Yu.S., K v a s o v B.I., M i r o s h n i c h e n k o V.L. Metody splayn-funktsiy [Spline-functions methods]. Moscow, Nauka, 1980. 352 p. (in Russian)

9. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaykin O.V. K raschetu prochnosti, zhestkosti i treshchinostyosti vnetsentrenero szhatykh zhelezobetonnykh elementov s primeneniem nelineynoy deformatsionnoy modeli [Calculation of strength, stiffness and crack resistance of eccentrically compressed reinforced concrete elements using non-linear deformation model]. Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta [News of Kazan State University of Architecture and Engineering]. 2013. No. 4 (26). Pp. 113–120. (in Russian)
 10. Karpenko N.I., Sokolov B.S., Radaykin O.V. K opredeleniyu deformatsiy izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov s ispol'zovaniem diagramm deformirovaniya betona i armatury [A determination of strain reinforce concrete flexural elements using stress-strain diagram of concrete and reinforcement]. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Construction and reconstruction]. 2012. No. 2. Pp. 11–19. (in Russian)
 11. Karpenko N.I., Radaykin O.V. K sovershenstvovaniyu diagramm deformirovaniya betona dlya opredeleniya momenta treshchinoobrazovaniya i razrushayushchego momenta v izgibaemykh zhelezobetonnykh elementakh [To improve the stress-strain diagram of concrete to determine the cracking moment and the failure moment in bending reinforced concrete elements]. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya [Construction and reconstruction]. 2012. No. 3. Pp. 10–16. (in Russian)
-

УДК 624.075.2.014.2

А.А. КОЛЬЗЕЕВ

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ СЕЧЕНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ СЖАТЫХ СВАРНЫХ ТРУБ ИЗ ДВУХ УГОЛКОВ В СОСТАВЕ ТРЕХПОЯСНЫХ ФЕРМ

Рассмотрены достоинства, особенности и область применения трехпоясных ферм покрытия с поясами из двух неравнополочных уголков, сваренных одинаковыми полками при прогонном решении (узловой передаче нагрузки). Получены коэффициенты устойчивости для центрально-сжатых стержней такого сечения. Проведено сравнение с нормативными документами. Показана возможность экономии стали при использовании трехпоясных ферм в покрытии здания.

Ключевые слова: трехпоясная ферма, сварная труба, коэффициенты устойчивости.

Достоинства металлических конструкций различного назначения со стержнями замкнутого (трубчатого) поперечного сечения подробно рассмотрены в работах [1, 2 и др]. Эффективными конструкциями покрытий можно считать пространственные трехпоясные фермы. Такие конструкции с поясами из «пятигранных труб» (пентагональное сечение, сваренное из прокатного швеллера и равнополочного уголка) и раскосной решеткой из одиночных уголков детально разработаны в монографии М.М. Копытова и А.В. Матвеева [2]. Пояса этих ферм также могут быть образованы из круглых либо из сварных труб – двухпрокатных неравнополочных уголков, сваренных одинаковыми полками. Решетка – из круглых труб или из двух равнополочных уголков, сваренных «в коробку». Пояса фермы расположены в вершинах правильного треугольника и соединяются решетками в трех плоскостях. Решетка – треугольная, узлы бесфасоночные (рис. 1).

Трехпоясные фермы выгодно применять в конструкциях покрытия с предварительным напряжением с помощью тросовых затяжек: удобно обеспечивать устойчивость сжимаемого пояса замкнутого сечения.

В случае неразрезной схемы покрытия выгодно предварительное напряжение (регулирование усилий) методом изменения уровня опор [3].

К нижним поясам трехпоясных ферм легко крепить подвесные крановые пути и менять их направление при изменении технологического процесса, что делает здание универсальным. Трехгранные блоки также можно применять в большепролетных рамках и арках, создавая эстетичные покрытия, не требующие подвесного потолка.

Одним из недостатков обычных двухпоясных ферм является относительно большая высота $1/4$ – $1/5$ пролета (оптимальная по расходу металла) и $1/7$ – $1/9$ пролета (из условий перевозки). Это приводит к увеличению внутреннего объема здания и, как следствие, росту расходов на отопление и вентиляцию, а также дополнительным расходам на стеновые панели (в пределах

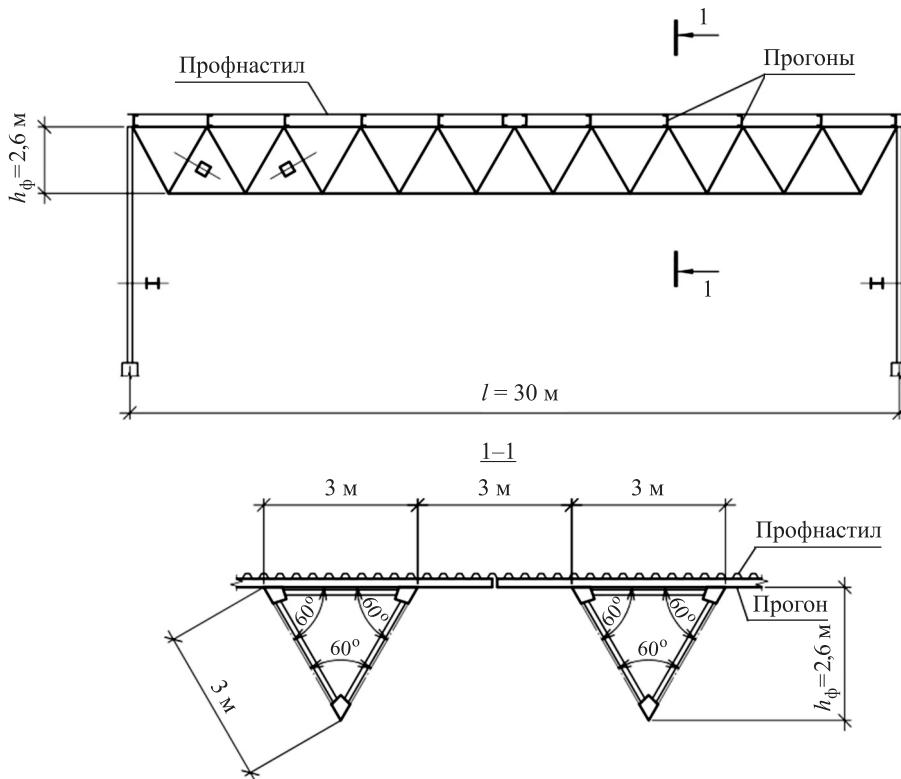


Рис. 1. Прогонное решение покрытия с трехпоясными фермами

высоты фермы). Высота таких ферм в коньке при пролетах более 36 м может превышать 4 м, что приводит к необходимости изготавливать и перевозить элементы фермы «rossсыпью». Это также повышает трудоемкость и стоимость монтажа.

Предварительный анализ показывает, что трехпоясные фермы могут применяться при пролетах до 48–54 м (вертикальный габарит 1/12–1/15 пролета), изготавливаться и перевозиться крупными отправочными марками длиной до 12–15 м (рис. 2).

Трехпоясные фермы с поясами из «пятигранных труб» внедрены в покрытиях ряда объектов [2]. Фермы с поясами из круглых труб были использованы в покрытии футбольного манежа «Заря» в г. Новосибирске (проект НИПСП «РЕКОН» при участии НГАСУ (Сибстрин)). Известен пример внедрения трехпоясных ферм с поясами из двух неравнополочных уголков, сваренных одинаковыми полками [3].

Резервы несущей способности трехпоясных ферм при непосредственном опирании стального профилированного настила на верхние пояса были исследованы на кафедре металлических и деревянных конструкций НГАСУ (Сибстрин) [4].

Цель данной работы – оценить резервы несущей способности по устойчивости сжатых стержней трехпоясных ферм (пояса – из двух неравнополочных уголков, сваренных одинаковыми полками) при опирании на верхние пояса прогонов, т. е. при узловом приложении нагрузки (рис. 2).

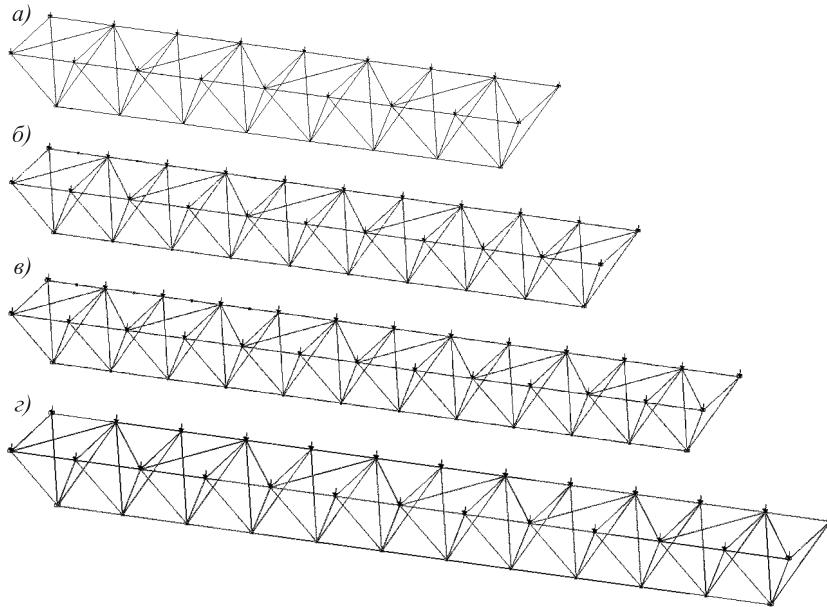


Рис. 2. Расчетные схемы трехпоясных ферм пролетом 24 (а), 30 (б), 36 (в), 48 (г) м

При этом необходимо решить такие задачи: как влияют замкнутая форма поперечного сечения, начальные геометрические несовершенства, гибкость стержня и прочность стали на величину критических напряжений и соответственно коэффициентов устойчивости.

Проблемами устойчивости сжатых стержней сварных ферм занимались с 30-х годов XX в. как в СССР, так и за рубежом. Известны экспериментальные исследования сварных ферм, на основе которых в нормы была введена инженерная методика расчета сжатых стержней поясов и решетки [5, 6].

Явление потери устойчивости фермы, в том числе и трехпоясной, должно рассматриваться как для единой конструкции. Методика, основанная на таком подходе, точнее отражает взаимодействие стержней и дает более надежные результаты. Критерий устойчивости фермы в этом случае

$$q \leq q_{cr},$$

где q – расчетная нагрузка на ферму;

q_{cr} – критическая нагрузка, при которой ферма теряет устойчивость.

В действующих нормах проектирования стальных конструкцийложен упрощенный подход. Несущая способность фермы по устойчивости обеспечена, если устойчивы ее отдельные стержни. Взаимосвязь между стержнями поясов и решетки в плоскости фермы учитывается с помощью коэффициентов расчетной длины μ , значения которых представлены в нормах. Расчетная длина вычисляется

$$l_{ef.x} = \mu l,$$

где l – геометрическая длина стержня. Расчетные длины сжатых поясов из плоскости ферм зависят от конструктивного решения покрытия и связевой компоновки.

Несущая способность сжатого стержня по устойчивости может быть определена по формуле

$$N_{cr} = \varphi R_y A \gamma_c,$$

где φ – коэффициент устойчивости, зависящий от формы поперечного сечения, а также гибкости λ и R_y ;

$$\lambda = \frac{l_{ef}}{i} (i – \text{радиус инерции сечения});$$

R_y – расчетное сопротивление стали сжатию по пределу текучести;

A – площадь поперечного сечения, брутто;

γ_c – коэффициент условий работы.

Коэффициенты устойчивости (коэффициенты продольного изгиба) впервые были введены в отечественные нормы НИТУ в 1934 г. До 2015 г. они корректировались в большую или меньшую стороны, но не учитывали форму поперечного сечения стержня. За рубежом на основе исследований, проведенных в ECCS (European Convention of Constructional Steelwork), были получены и введены в нормы ряда западно-европейских стран пять кривых φ , учитывающих форму поперечного сечения и влияние остаточных напряжений от прокатки, сварки и резки [7]. В действующих нормах Российской Федерации влияние формы сечения стержня учитывается с помощью трех кривых φ : *a* (наивысшая) – круглые и гнуто-сварные трубы; *b* – двутавры и сварные прямоугольные трубы и *c* – открытые типы сечений (тавр, швеллер и др.).

Исследованиями установлено, что факторами, оказывающими наибольшее влияние на устойчивость стержня, являются его общая начальная погибь f_0 и случайная расцентровка e_0 [8, 9]. В отечественные нормы заложена синусоидальная начальная погибь с максимальной стрелкой $f_0 = \frac{1}{750}l$ [10], которая была принята на основе работ А.В. Геммерлинга [11]. В то же время в нормах западно-европейских стран $f_0 = \frac{1}{1000}l$ [7].

На кафедре металлических и деревянных конструкций НГАСУ (Сибстрин) выполнена оценка влияния замкнутой формы сечения на величину начальной погиби на основе критерия равенства работ. Установлено, что внешние силовые возмущения при совершении одинаковой работы приведут к образованию меньшей величины начальной погиби в стержнях из труб по сравнению с открытыми сечениями. Величина стрелки начальной погиби зависит также от гибкости.

Максимальная стрелка $f_0 = \frac{1}{750}l$ при $\lambda > 120$. При гибкости стержня не более 80 стрелка может быть принята $\frac{1}{1000}l$. В интервале гибкостей от 80 до 120 – линейная зависимость от $f_0 = \frac{1}{1000}l$ до $\frac{1}{750}l$. Приведенная зависимость справедлива для любых замкнутых (трубчатых) сечений. Полученные результаты согласуются с результатами статистических исследований в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко [12].

Конечно, на величину начальной погиби влияют продольные сварные швы. Остаточные сварочные деформации увеличивают общую погибь стержня. Для уменьшения влияния сварочных напряжений и деформаций рекомендуется продольные швы выполнять автоматической сваркой одновременно с двух сторон с использованием прихваток и минимальных катетов швов. Случайные эксцентрикитеты, возникающие при изготовлении и монтаже металлоконструкций и заложенные в отечественные нормы, принятые $e_0 = 1/20i$ на основе исследований А.Р. Ржаницына [13].

Для оценки резервов в качестве модели пояса будем использовать замкнутое сечение из двух неравнополочных уголков $180 \times 110 \times 10$, сваренных одинаковыми полками (см. рис. 1, таблица). Такого поперечного сечения, так же как и пентагонального [2], в действующих отечественных нормах нет.

Расчеты выполнялись с помощью компьютерной программы PSK [4], реализованной в НГАСУ (Сибстрин) на языке программирования «С».

В основе алгоритма этой программы, разработанной в ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова, лежит метод перемещений с использованием суперэлементов. Критическая нагрузка вычисляется с учетом физической и геометрической нелинейности, а также развития зон упругопластических деформаций по длине стержня. Физическая нелинейность работы материала модели учитывается с помощью диаграммы сжатия стали, предложенной ЦНИИПСК и задаваемой координатами точек.

Результаты расчетов по PSK сравнивались с расчетами по программе, разработанной в ЦНИИПСК, которая основана на методе варьирования уравнений равновесия по параметрам перемещения при стационарности нагрузки. Данный метод теоретически обоснован А.В. Геммерлингом [11]. Расхождения по программам не более 1–2 %. Результаты расчетов по PSK подтверждаются экспериментально. В НГАСУ (Сибстрин) проведены испытания 20 моделей сжатых стержней трубчатого сечения длиной 3 м, сваренных из двух уголков. Несущая способность моделей по устойчивости, вычисленная по PSK, хорошо согласуется с экспериментом. Расхождение 7–10 %.

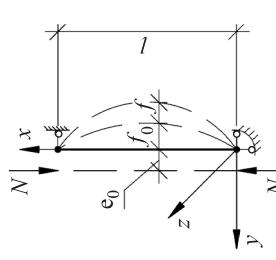
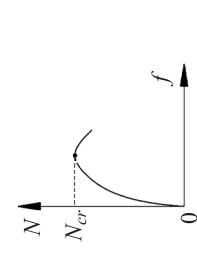
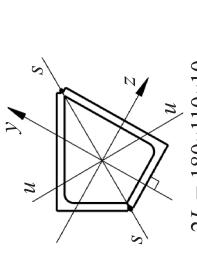
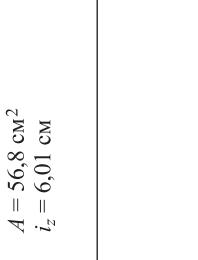
Характеристики моделей для данных расчетов: длина стержня – 2–6 м (гибкость $\lambda = 33–100$); материал – сталь по ГОСТ 27772–88 с расчетным сопротивлением $R_y = 240–480$ МПа (таблица). Начальная погибь f_0 и случайный эксцентрикитет e_0 задавались относительно оси z , т.е. в плоскости фермы (наклонной или горизонтальной). Максимальное значение стрелки начальной погиби модели стержня: $f_0 = \left(\frac{1}{1000} - \frac{1}{750} \right) l$ или от 2 до 7 мм.

Величина начального случайного эксцентрикитета: $e_0 = \frac{i}{20}$, т.е. 3 мм.

Расчетная схема модели стержня приведена в таблице. Для каждого варианта вычислялись критическая нагрузка N_{cr} и коэффициент устойчивости

$$\varphi = \frac{N_{cr}}{AR_y}.$$

Результаты расчета по программе PSK для сварной трубы из двух неравнополочных уголков

Расчетная схема и поперечное сечение стержня	λ_z	$R_y = 240 \text{ МПа}$			$R_y = 320 \text{ МПа}$			$R_y = 400 \text{ МПа}$			$R_y = 480 \text{ МПа}$		
		N_{cr} , кН	φ_{PSK}	Φ_{CII}	N_{crs} кН	φ_{PSK}	Φ_{CII}	N_{crs} кН	φ_{PSK}	Φ_{CII}	N_{crs} кН	φ_{PSK}	Φ_{CII}
	33	1291	0,947	0,935	1699	0,935	0,917	2093	0,921	0,9	2478	0,909	0,883
	50	1189	0,873	0,869	1526	0,84	0,848	1843	0,811	0,797	2128	0,780	0,762
	67	1066	0,782	0,782	1332	0,733	0,718	1552	0,683	0,659	1752	0,643	0,602
	83	929	0,681	0,681	1116	0,614	0,594	1246	0,548	0,52	1357	0,498	0,458
$2L = 180 \times 110 \times 10$													
$A = 56,8 \text{ см}^2$													
$i_z = 6,01 \text{ см}$													
100	787	0,577	0,566	902	0,496	0,47	973	0,428	0,398	1017	0,373	0,333	

Потеря устойчивости таких стержней происходит в изгибной форме относительно оси z . Программа PSK показывает практическое отсутствие углов поворота относительно продольной оси. Это объяснимо большой жесткостью на кручение сварной трубы. Отсутствие закручивания стержней подтверждает эксперимент со сварными прямоугольными трубами, проведенный в НГАСУ.

Результаты вычислений по PSK приведены в таблице и на рис. 3.

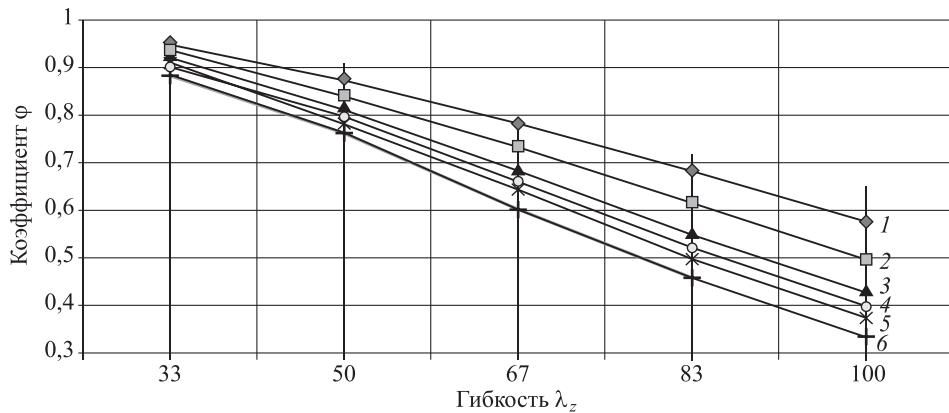


Рис. 3. Зависимость коэффициентов устойчивости сварных труб от гибкости стержня и прочности стали

1 - $R_y = 240$ МПа ϕ_{PSK} ; 2 - $R_y = 320$ МПа ϕ_{PSK} ; 3 - $R_y = 400$ МПа ϕ_{PSK} ;
4 - $R_y = 400$ МПа ϕ_{SP} ; 5 - $R_y = 480$ МПа ϕ_{PSK} ; 6 - $R_y = 480$ МПа ϕ_{SP}

Анализируя результаты, можно заключить, что значения коэффициентов устойчивости ϕ для стержней замкнутого сечения из двух неравнополочных уголков, сваренных одинаковыми полками, вычисленные по PSK, выше нормативных (СП 16.13330.2011, кривая b). Для стали с $R_y = 240$ МПа расхождения 0–2 %. Для легированных сталей с $R_y = 320$ –480 МПа расхождения увеличиваются от 2 до 12 % ($\phi_{PSK} > \phi_b$).

Влияние гибкости на коэффициенты ϕ также возрастает с увеличением прочности. Более высокие значения коэффициентов ϕ , вычисленные по PSK, по сравнению с СП 16.13330.2011 можно объяснить меньшими величинами начальной погибы стержней из сварных труб и более рациональным распределением металла по сечению в сравнении с двутаврами. Анализ расхода металла на сжатые пояса трехпоясной фермы пролетом 30 м с опиранием в уровне верхних поясов (см. рис. 1) показывает, что возможная экономия стали может составлять до 10–12 %.

Выводы. 1. Коэффициенты устойчивости ϕ для замкнутых сечений из двух неравнополочных уголков, сваренных одинаковыми полками, выше нормативных на 2–12 %. В таких стержнях выгодно использовать легированную сталь.

2. Случайный эксцентрикситет e_0 оказывает незначительное влияние на устойчивость стержня в рассматриваемом интервале гибкостей, что согласуется с [8].

3. Стержни из двух неравнополочных уголков, сваренных одинаковыми полками, можно в запас рассчитывать с помощью коэффициентов устойчивости ϕ_b СП 16.13330.2011.

4. Введение трех кривых для коэффициентов устойчивости ϕ позволяет повысить надежность расчетов сжатых стержней. Благодаря рациональному распределению металла в сварных трубах они имеют ядерные расстояния сечений в 1,5–2 раза больше, чем эквивалентные по площади открытые сечения (тавр, швеллер и др.), что делает их менее чувствительными к влиянию начальной погиби и случайной расцентровки. Общая начальная погибь сварных труб на 10–20 % меньше нормируемой величины, что также создает резервы. Поэтому, является логичным введение отдельной кривой ϕ для сварных труб из уголков, швеллеров и их комбинаций.

5. Использование сварных труб из уголков, в том числе и в трехпоясных фермах, позволит получить дополнительную экономию металла до 5–7 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бирюлев В.В. Металлические конструкции со сварными замкнутыми сечениями из прокатных элементов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1980. № 7. С. 8–14.
2. Копытов М.М., Матвеев А.В. Легкие металлоконструкции из пятигранных труб. Томск: СТТ, 2007. 124 с.
3. Бирюлев В.В. Металлические неразрезные конструкции с регулированием уровня опор. М.: Стройиздат, 1984. 88 с.
4. Колзееев А.А. Оценка влияния замкнутой формы сечения на устойчивость сжатых стальных стержней трехпоясных ферм // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 11–12. С. 108–113.
5. Никифоров С.Н. Устойчивость сжатых стержней сварных ферм. М.; Л.: Госстройиздат, 1938. 82 с.
6. Ривкин А.М. Результаты исследования устойчивости сжатых стержней решетки в фермах из стальных труб // Пром. стр-во. 1971. № 9. С. 42–44.
7. Stability of metal structures – a world view // Engineering Journal. 1981. Vol. 18, No. 3. P. 90–126.
8. Лейтес С.Д. Устойчивость сжатых стальных стержней. М.: Госстройиздат, 1954. 308 с.
9. Стрелецкий Н.С. Работа сжатых стоек: Материалы к курсу стальных конструкций. Вып. 2. Ч. 1. М.: Госстройиздат, 1959. 283 с.
10. Бельский Г.Е. Обоснование нормативных предложений по расчету сжатых и сжато-изогнутых стержней из высокопрочных сталей // Металлические конструкции: сб. ст. ЦНИИСК / под ред. В.А. Балдина. М.: Стройиздат, 1968. С. 79–85.
11. Геммерлинг А.В. Несущая способность стержневых стальных конструкций. М.: Госстройиздат, 1958. 216 с.
12. Кошутин Б.Н., Косоруков В.А. Статистическое исследование влияния погнутостей сжатых стержней решетки стропильных ферм на их несущую способность // Исследование нагрузок на сооружения и надежности строительных конструкций: Тр. ЦНИИСК. М., 1976. С. 52–61.
13. Ржаницын А.Р. Устойчивость равновесия упругих систем. М.: Гостехиздат, 1955. 476 с.

Кользееев Андрей Александрович, канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Kol'zeyev Andrey Aleksandrovich, PhD, Ass. Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

INFLUENCE OF THE FORM OF SECTION ON THE STABILITY OF COMPRESSED WELDED TUBES FROM TWO ANGLES IN THREE-FLANGE TRUSSES

The advantages, features and application area of three-flange cover trusses with flange of two unequal angles, welded same corners, when beam decision (nodal load transfer) are considered. The stability coefficients for centrally compressed bars of this section are obtained. Comparison with normative documents were held. The possibility of saving steel with using three-flange trusses in cover of building are shown.

К e y w o r d s: three-flange truss, welded tube, stress reduction coefficients.

REFERENCES

1. Bir'yulev V.V. Metallicheskie konstruktsii so svarnymi zamknutymi secheniyami iz prokatnykh elementov [Metal constructions with welded closed sections of the rolling elements]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture]. 1980. No. 7. Pp. 8–14. (in Russian)
2. Kopytov M.M., Matveev A.V. Legkie metallokonstruktsii iz pyatigrannikh trub [Light metal structures made of pentahedral tubes]. Tomsk, 2007. 124 p. (in Russian)
3. Bir'yulev V.V. Metallicheskie nerazreznye konstruktsii s regulirovaniem urovnya opor [Metal uncut constructions with the regulation level of supports]. Moscow, Stroyizdat, 1984. 88 p. (in Russian)
4. Kol'zeyev A.A. Otsenka vliyaniya zamknutoy formy secheniya na ustoychivost' szhatykh stal'nykh sterzhney trekhpoyasnykh ferm [Estimation of influence of the closed form of section on the stability of compressed steel rods of three-flange trusses]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2012. No. 11–12. Pp. 108–113. (in Russian)
5. Nikiforov S.N. Ustoychivost' szhatykh sterzhney svarynykh ferm [Stability of compressed rods of welded trusses]. Moscow, Leningrad, Gosstroyizdat, 1938. 82 p. (in Russian)
6. Rivkin A.M. Rezul'taty issledovaniya ustoychivosti szhatykh sterzhney reshetki v fermakh iz stal'nykh trub [The results of study of stability of compressed lattice rods in trusses of steel tubes]. Promyshlennoe stroitel'stvo [Industrial construction]. 1971. No. 9. Pp. 42–44. (in Russian)
7. Stability of metal structures – a world view. Engineering Journal. 1981. Vol. 18, No. 3. Pp. 90–126.
8. Leytes S.D. Ustoychivost' szhatykh stal'nykh sterzhney [Stability of compressed steel rods]. Moscow, Gosstroyizdat, 1954. 308 p. (in Russian)
9. Strelets'kiy N.S. Rabota szhatykh stoeok: Materialy k kursu stal'nykh konstruktsiy [Work of compressed pillars. Materials for the steel constructions course]. Moscow, Gosstroyizdat, 1959. 283 p. (in Russian)
10. Bel'skiy G.E. Obosnovanie normativnykh predlozheniy po raschetu szhatykh i szhato-izognutnykh sterzhney iz vysokoprochnykh staley [Justification of regulatory proposals for the calculation of compressed and compressed-bent rods made of high-strength steels]. Metallicheskie konstruktsii [Metal constructions]. Moscow, Stroyizdat, 1968. Pp. 79–85. (in Russian)

11. G e m m e r l i n g A.V. Nesushchaya sposobnost' sterzhnevykh stal'nykh konstruktsiy [Bearing capacity of rod steel constructions]. Moscow, Gosstroyizdat, 1958. 216 p. (in Russian)
 12. K o s h u t i n B.N., K o s o r u k o v V.A. Statisticheskoe issledovanie vliyaniya pognutostey szhatykh sterzhney reshetki stropil'nykh ferm na ikh nesushchuyu sposobnost' [The statistical study of the influence of bent compressed rods of lattice trusses on their bearing capacity]. Issledovanie nagruzok na sooruzheniya i nadezhnosti stroitel'nykh konstruktsiy [Research of loads on structures and reliability of building constructions]. Moscow, 1976. Pp. 52–61. (in Russian)
 13. R z h a n i t s y n A.R. Ustoychivost' ravnovesiya uprugikh system [Stability of balance of elastic systems]. Moscow, Gostekhizdat, 1955. 476 p. (in Russian)
-

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.54 : 539.4

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

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЛИЯНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ КИСЛОТ НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ, НАПОЛНЕННОГО ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩЕЙ ПОРОДОЙ

Методом статистического контакта фаз изучено взаимодействие цементного камня, наполненного цеолитсодержащими породами, с растворами минеральных кислот (соляной, серной, фосфорной) различной концентрации. Проведен термодинамический анализ взаимодействия цементного камня с фосфорной, серной, соляной кислотами, рассчитаны изменения функции Гиббса, константы равновесия. Установлены возможность самопроизвольного протекания химических реакций и неустойчивость изучаемой системы при заданных условиях. Определены численные значения термодинамических констант равновесия, согласно которым наиболее глубоко будет протекать реакция с фосфорной кислотой. Образование фосфата кальция вызывает кольматацию пор, что приводит к замедлению процесса коррозии и повышению прочности цементного камня.

Ключевые слова: цементный камень, цеолитсодержащая порода, энталпия, энтропия, функция Гиббса, константа равновесия и скорости, прочность.

Бетон давно получил широкое распространение в строительстве, что обусловлено большими возможностями, которые представляет этот материал. Применяя различные цементы, заполнители, химические и минеральные добавки, можно получать бетоны с заранее заданными эксплуатационными свойствами, в том числе и повышенной стойкости при воздействии агрессивных сред. При этом важное значение приобретают технологии производства бетонов, основанные на экономии ресурсов как материальных, так и энергетических. Перспективны направления исследований, связанные с разработкой бетонов, обеспечивающих снижение расхода цемента [1, 2].

Широкое применение находят в производстве строительных материалов цеолитсодержащие породы (ЦСП), которые наряду с экономией цемента на 20–30 % позволяют улучшить ряд свойств бетонов. Значительно повышается коррозионная стойкость, морозостойкость, прочность [3–6].

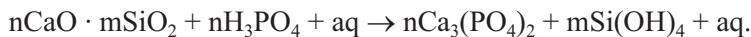
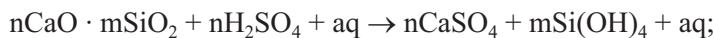
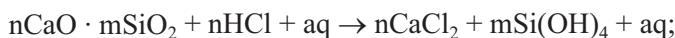
© Селяев В.П., Седова А.А., Куприяшкина Л.И., Осипов А.К., Куприяшкина Е.И.,
Гарынкина Е.Н., 2017

Задачей настоящей работы являлось изучение процессов взаимодействия цементного камня, наполненного ЦСП, с растворами минеральных кислот 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 при конденсации на поверхности конструкций влаги, если в атмосфере содержатся агрессивные вещества. Поэтому необходимо знать процессы, происходящие при кислотной коррозии бетона [7, 8].

Исследования проводились по следующей методике: готовые образцы (не менее пяти) массой $\approx 17,5$ г, на цементном связующем М400, со степенью наполнения 10, 20, 30 % ЦСП от массы цемента, помещали в емкости с растворами хлористоводородной, серной и фосфорной кислот, с концентрацией 1, 2, 3 %, объемом 350 мл и выдерживали 7, 14, 28 сут. После экспонирования 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 РІА-1000. Элементный анализ осадков, выделенных из цементного камня в процессе экспонирования в растворах кислот, определяли рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре ARL «Porfopem» и энергодисперсионным рентгеновским методом. Кислотность растворов контролировали с помощью pH-метра «Эксперт-pH».

Установлен вид и характер кинетических зависимостей pH раствора от времени экспонирования цементного камня в агрессивной среде. Экспериментальные данные представлены на рисунке и в табл. 1. Из рисунка видно, что наступление равновесия в системе «цементный камень – кислота» зависит от природы и концентрации кислоты. В растворах хлористоводородной кислоты равновесие наступает при высоких значениях pH 10–11 на 15–20 сут, в растворах серной и фосфорной кислот – при низких значениях pH. В серной кислоте pH 2,5–3,5 через 20–22 сут, в фосфорной кислоте pH 4,0–5,0 через 5–8 сут.

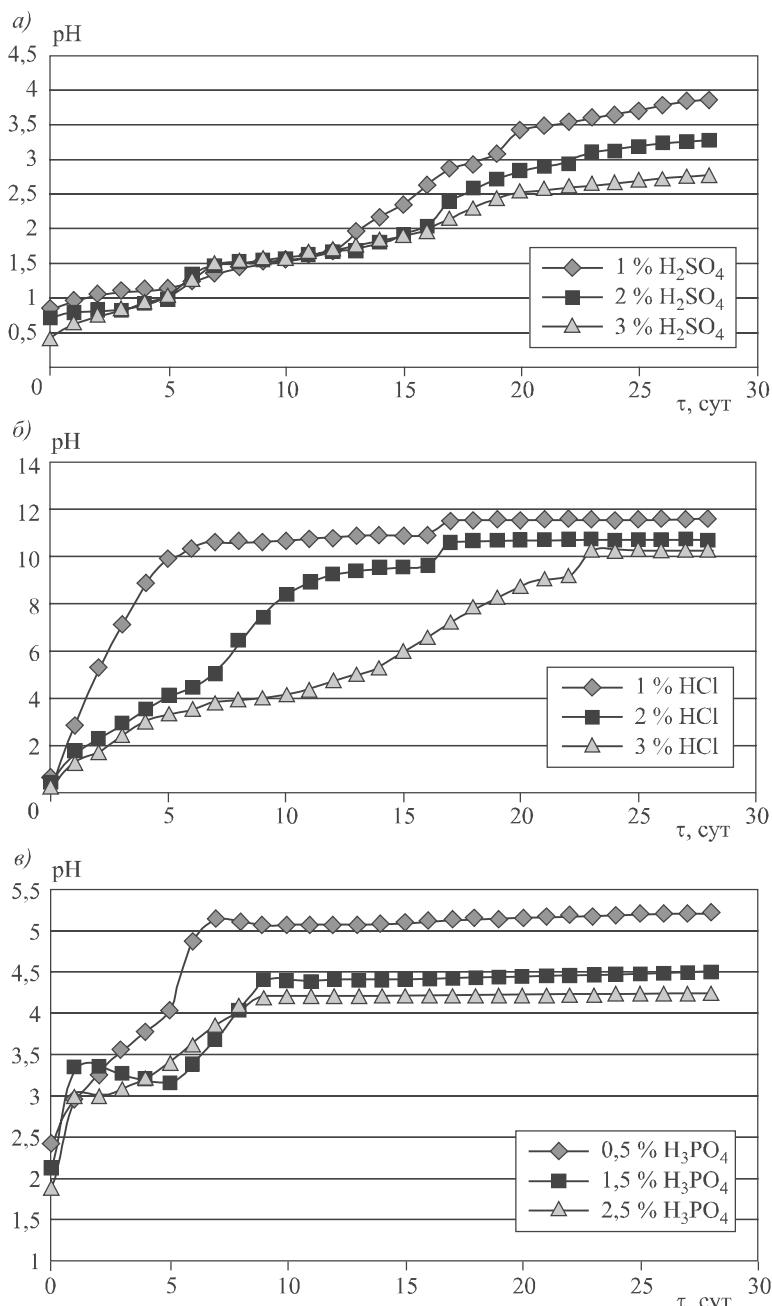
Химический процесс взаимодействия цементного камня с минеральными кислотами можно в общем виде описать уравнениями реакций:



При низких значениях pH возможно образование кислых солей кальция с фосфорной кислотой $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$; CaHPO_4 .

При контакте цементного камня с водой составные части его могут растворяться и вымываться водой. Наиболее легко растворимым продуктом гидратации цемента является гидроксид кальция, выщелачивание которого ведет к гидролизу цементного клинкера.

В зависимости от природы кислоты в процессе реакции с гидроксидом кальция образуются разные соли. Скорость разрушения цементного камня



Динамика изменения pH среды при выдерживании цементного камня, наполненного ЦСП (20 %), в растворах: серной (а), соляной (б), ортофосфорной (в) кислот различной концентрации в течение 28 сут

будет зависеть от растворимости солей кальция. При большой растворимости солей быстрее протекает разрушение цементного камня. Если продукты реакции малорастворимые, то, оставаясь на месте реакции на поверхности бетона, они закупоривают поры и закрывают доступ агрессивной среды к внутренним слоям цементного камня и замедляют скорость коррозии. Об этом свидетельствуют экспериментальные данные на рисунке и в табл. 1.

При взаимодействии цементного камня с HCl образуется растворимая соль CaCl₂, гидроксид кальция не полностью нейтрализуется кислотой, поэтому равновесие в системе наступает при высоких значениях pH 10–11. Образовавшийся гель кремниевой кислоты заполняет поры бетона и закрывает доступ HCl к внутренним слоям бетона. Следовательно, равновесие в системе «цементный камень – HCl» зависит от концентрации HCl.

При взаимодействии цементного камня с H₂SO₄ образуется CaSO₄ и гель кремниевой кислоты, независимо от концентрации кислоты равновесие в системе «цементный камень – H₂SO₄» устанавливается медленно (рисунок, а, табл. 1) при низких значениях pH 3,5–2,5. Вероятно, кристаллизация гипса в порах бетона вызывает напряжение в стенках пор капилляров и приводит к разрушению структурных элементов бетона.

При взаимодействии фосфорной кислоты с цементным камнем образуется малорастворимый фосфат кальция и гель кремниевой кислоты, которые остаются на поверхности бетона, заполняют его поры и закрывают доступ агрессивной среды к внутренним слоям и замедляют скорость коррозии. Равновесие в системе «цементный камень – H₃PO₄» наступает быстрее (рисунок, в, табл. 1).

Для сравнительной характеристики действия минеральных кислот HCl, H₂SO₄, H₃PO₄ на цементный камень, наполненный ЦСП, проведен термодинамический анализ изучаемых систем, рассчитаны изменения функции Гиббса, константы равновесия [6]. Реакция, для которой константа равновесия велика, практически протекает до конца. При малой ее величине реакция почти не идет и ее можно не принимать во внимание. В настоящей работе проведен термодинамический анализ взаимодействия цементного камня с фосфорной, серной, соляной кислотами по химическим уравнениям реакций:

- 1) 3 CaO · SiO₂ + 2H₃PO₄ + 3H₂O → Ca₃(PO₄)₂ + 3(SiO₂ · 2H₂O);
- 2) CaO · SiO₂ + 2H₃PO₄ + H₂O → Ca(H₂PO₄)₂ + SiO₂ · 2H₂O;
- 3) CaO · SiO₂ + H₃PO₄ + H₂O → CaHPO₄ + SiO₂ · 2H₂O;
- 4) CaO · SiO₂ + 2HCl + H₂O → CaCl₂ + SiO₂ · 2H₂O;
- 5) CaO · SiO₂ + H₂SO₄ + H₂O → CaSO₄ + SiO₂ · 2H₂O.

Изменение функции Гиббса при температуре 298 K рассчитывали, используя справочные данные, по уравнениям:

$$\Delta_r G^\circ_{298} = \sum_j \Delta_f G^\circ_{298(\text{прод})} - \sum_j \Delta_f G^\circ_{298(\text{исх})}; \quad (1)$$

Таблица 1. Динамика изменения pH среды при выдерживании цементного камня в растворах кислот в течение 28 сут

Кислота	Концентрация кислоты, %	pH наступившего равновесия	τ, сут
HCl	1	11,0	6
	2	10,5	16
	3	10,0	20
H ₂ SO ₄	1	3,5	20
	2	3,2	23
	3	2,5	25
H ₃ PO ₄	0,5	4,8	5
	1,5	4,0	6
	2,5	3,8	8

Примечание. Степень наполнения ЦСП 20 %.

$$\Delta_r H_{298}^{\circ} = \sum_j \Delta_f H_{298(\text{прод})}^{\circ} - \sum_j \Delta_f H_{298(\text{исх})}^{\circ}; \quad (2)$$

$$r\Delta G_{\tau}^{\circ} = \Delta_r H_{\text{T}}^{\circ} - T\Delta_r S_{\text{T}}^{\circ}. \quad (3)$$

Справочные величины представлены в табл. 2, где указаны исходные вещества, предполагаемые продукты реакции и их термодинамические функции.

Таблица 2. Стандартные энталпии и энтропии образования веществ при 298 К

Соединение	$-\Delta_f H_{298}^{\circ}$, кДж/моль	S_{298}° , ДЖ/(моль · К)	$-\Delta_f G_{298}^{\circ}$, кДж/моль
CaO · SiO ₂ _(TB)	1636,03	81,98	1550,75
H ₃ PO ₄ _(TB)	1279,9	110,5	1119,856
Ca ₃ (PO ₄) ₂ _(TB)	4123,6	236,1	1887,4
Ca(H ₂ PO ₄) ₂ _(TB)	3106,77	191,04	2811,8
CaHPO ₄ _(TB)	1815,61	111,45	1682,38
SiO ₂ · 2H ₂ O _(TB)	1480,0	200,18	1333,86
HCl _(r)	92,36	186,915	95,359
CaCl ₂ _(TB)	795,0	113,6	750,2
H ₂ SO ₄ _(ж)	814,8	157,01	690,751
CaSO ₄ _(TB)	1435,07	106,8	1322,74
H ₂ O _(ж)	285,83	70,08	237,25

Изменение функции Гиббса в расчетах по формулам (1)–(3) получилось примерно равным. Для вычисления константы равновесия взяты средние значения функции Гиббса.

Константу равновесия K_p рассчитывали по уравнению

$$K_p = \exp\left(-\frac{\Delta G}{RT}\right).$$

$$1) K_p = \exp\left(-\frac{-285505}{8,314 \cdot 298}\right) = 1,12 \cdot 10^{50};$$

$$2) K_p = \exp\left(-\frac{-114230}{8,314 \cdot 298}\right) = 1,15 \cdot 10^{20};$$

$$3) K_p = \exp\left(-\frac{-108430}{8,213 \cdot 298}\right) = 1,01 \cdot 10^{19};$$

$$4) K_p = \exp\left(-\frac{-105950}{8,314 \cdot 298}\right) = 3,72 \cdot 10^{18};$$

$$5) K_p = \exp\left(-\frac{-177820}{8,314 \cdot 298}\right) = 1,48 \cdot 10^{31}.$$

Все полученные данные представлены в табл. 3.

Сравнительная характеристика влияния минеральных кислот на прочность...

Таблица 3. Энталпия, энтропия, функция Гиббса и константы равновесия для реакций (1)–(5). Т = 298 К

Среда	Продукты реакции	ΔH , кДж/моль	ΔS , Дж/моль · К	ΔG , кДж/моль	K_p
H_3PO_4	$Ca_3(PO_4)_2 + 3(SiO_2 \cdot 2H_2O)$	-238,22	159,46	-285,50	$1,12 \cdot 10^{50}$
H_3PO_4	$Ca(H_2PO_4)_2 + SiO_2 \cdot 2H_2O$	-105,11	18,16	-114,23	$1,15 \cdot 10^{20}$
H_3PO_4	$CaHPO_4 + SiO_2 \cdot 2H_2O$	-93,85	49,07	-108,43	$1,01 \cdot 10^{19}$
HCl	$CaCl_2 + SiO_2 \cdot 2H_2O$	-199,75	-212,11	-105,95	$3,72 \cdot 10^{18}$
H_2SO_4	$CaSO_4 + SiO_2 \cdot 2H_2O$	-178,71	-2,09	-177,82	$1,48 \cdot 10^{31}$

Из проведенного термодинамического анализа сделаны следующие выводы:

изменение величины функции Гиббса во всех случаях имеет отрицательное значение, что говорит о возможности самопроизвольного протекания химической реакции, и составная часть изучаемой системы при заданных условиях неустойчива;

численное значение константы равновесия позволяет судить о глубине протекания химической реакции: чем больше константа равновесия, тем глубже в прямом направлении протекает реакция.

Из табл. 3 видно, что наиболее глубоко будет протекать реакция с фосфорной кислотой с образованием ортофосфата кальция.

Прочность на сжатие цементных композитов определялась по величине разрушающей нагрузки. Результаты испытаний на прочность после экспонирования в модельных растворах кислот представлены в табл. 4. Экспериментальные данные свидетельствуют, что наибольшую прочность на сжатие показали образцы, выдержанные в растворах фосфорной кислоты. Наименьшей прочностью обладают образцы из модельных растворов H_2SO_4 . Прочность цементных композитов зависит от природы кислоты, ее концентрации, времени контакта цементного камня с агрессивной средой, от степени наполнения ЦСП.

Таблица 4. Результаты определения средней прочности на сжатие ($\bar{R}_{сж}$, МПа) после экспонирования цементного камня в модельных растворах кислот через 28 сут

Кислота	Концентрация кислоты, %	ЦСП, %			
		0	10	20	30
H_3PO_4	0,5	61,96	55,37	53,75	55,02
	1,5	52,57	48,80	42,69	38,68
	2,5	41,83	47,96	44,00	35,02
H_2SO_4	1,0	—	26,4	25,8	24,7
	2,0	—	25,0	23,0	20,1
	3,0	—	24,4	17,2	16,5
HCl	1,0	—	29,7	26,1	20,9
	2,0	—	25,3	23,6	19,4
	3,0	—	26,5	26,1	17,3

Ортофосфорная кислота образует малорастворимый фосфат кальция. Фосфат кальция и гель кремниевой кислоты почти полностью остаются в порах бетона, вызывая их частичное закупоривание (кольматацию), что приводит к замедлению процесса коррозии бетона (самотормозящий 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 [10–12]. Именно об этом свидетельствует вычисленная константа скорости реакции.

По мере выдерживания цементного камня в растворах серной кислоты происходит накопление и кристаллизация малорастворимых продуктов в порах бетона CaSO_4 и геля кремниевой кислоты. Кристаллизация гипса в порах бетона создает внутреннее напряжение. Бетон разрушается из-за давления кристаллов гипса (гипсовая коррозия). Поэтому композиты после экспонирования в растворах серной кислоты обладают низкой прочностью на сжатие, даже ниже, чем после выдерживания в растворах соляной кислоты. Увеличение степени наполнения композитов цеолитсодержащей породой в больших концентрациях (25–30 %) приводит к снижению прочности на сжатие. При любых видах кислотной агрессии рекомендуется использовать не более 10–15 % активных минеральных добавок осадочного происхождения, которые повышают водопотребность бетона.

Таким образом, экспериментальные данные по изучению воздействия минеральных кислот H_2SO_4 , HCl , H_3PO_4 на цементный камень, наполненный ЦСП на 10, 20, 30 %, позволили сделать вывод, что наиболее агрессивной по отношению к бетону является серная кислота. Менее агрессивна ортофосфорная кислота, за счет образования малорастворимого фосфата кальция и геля кремниевой кислоты, что приводит к замедлению коррозии бетона (самотормозящий процесс).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Соломатов В.И., Селяев В.П., Соколова Ю.А. Химическое сопротивление материалов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: РААСН, 2001. 248 с.
2. Соломатов В.И. Развитие полиструктурной теории композиционных строительных материалов // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1985. № 8. С. 26–30.
3. Селяев В.П., Неверов В.А., Куприяшкина Л.И. Влияние цеолитсодержащих наполнителей на прочность и пористость цементных композитов // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 6. С. 36–44.
4. Седова А.А., Иванов В.М., Селяев В.П., Осипов А.К., Куприяшкина Л.И. Изучение процессов повреждения цементного камня растворами карбоновых кислот // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2: Химия. 2014. Т. 55, № 5. С. 296–301.
5. Селяев В.П., Седова А.А., Куприяшкина Л.И., Осипов А.К. Изучение процессов повреждения цементного камня, наполненного цеолитсодержащей породой, растворами хлористоводородной кислоты // Изв. вузов. Строительство. 2014. № 7. С. 32–38.
6. Полюдов С.В., Коломиец В.И., Соломатов В.И. Цементоцеолитовые композиты // Изв. вузов. Строительство. 1995. № 3. С. 41–46.

7. Москвин В.М., Иванов А.М., Алексеев С.Н. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М.: Стройиздат, 1980. 533 с.
8. Mohemoghadam B., Dianat S.N. Evolution of the corrosion and strength of exposed to sulfate solution // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2012. Vol. 3, Iss. 2. P. 198–206.
9. Краткий справочник физико-химических величин. 10-е изд., испр. и доп. / под ред. А.А. Равделя, А.М. Пономаревой. СПб.: Иван Федоров, 2003. 240 с.
10. Тейлор Х.Ф. Химия цемента. М.: Стройиздат, 1998. 520 с.
11. Рахимбаев Ш.М. Процессы кольматации при химической коррозии цементных систем. Физическая модель // Бетон и железобетон. 2013. № 4. С. 30–32.
12. Рахимбаев Ш.М. Кинетика процессов кольматации при химической коррозии цементных систем // Бетон и железобетон. 2012. № 6. С. 16–17.

Селяев Владимир Павлович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф.;
E-mail: ntorm80@mail.ru

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Седова Анна Алексеевна, канд. хим. наук, доц.

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Куприяшкина Людмила Ивановна, канд. техн. наук, проф.;

E-mail: kupriashkina.liudmila@yandex.ru

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Осипов Анатолий Константинович, канд. хим. наук, доц.

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Куприяшкина Елена Игоревна, магистр

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Гарынкина Екатерина Николаевна, магистр

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Получено 23.12.16

Selyaev Vladimir Pavlovich, Academician of RAASN, DSc, Professor;
E-mail: ntorm80@mail.ru

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

Sedova Anna Alekseevna, PhD, Ass. Professor

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

Kupriyashkina Lyudmila Ivanovna, PhD, Professor;

E-mail: kupriashkina.liudmila@yandex.ru

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

Osipov Anatoliy Konstantinovich, PhD, Ass. Professor

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

Kupriyashkina Elena Igorevna, MSc

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

Garynkina Ekaterina Nikolaevna, MSc

Ogarev Mordovian State University, Saransk, Russia

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF THE EFFECT OF MINERAL ACIDS ON THE STRENGTH OF CEMENT STONE, FILLED WITH THE ZEOLITE CONTAINING ROCK

By the method of statistical contact of the phases was studied by the interaction of cement stone, filled with a zeolite-containing rocks, with solutions of mineral acids (hydrochloric, sulfuric, phosphoric) in different concentrations. A thermodynamic analysis of the interaction of cement stone with phosphoric, sulphuric, hydrochloric acids, calculated changes in Gibbs functions, equilibrium constants. Installed the possibility of spontaneous chemical reactions and the instability of the studied system under specified conditions. Determined numerical values of thermodynamic equilibrium constants, according to which most deeply will proceed the reaction with phosphoric acid. The formation of calcium phosphate causing the clogging of pores that leads to a slow process of corrosion and increasing the strength of cement.

К e y w o r d s: cement stone, zeolite-containing rocks, enthalpy, entropy, Gibbs function, equilibrium constant, and speed, strength.

REFERENCES

1. Solomatov V.I., Selyaev V.P., Sokolova Yu.A. Khimicheskoe soprotivlenie materialov [Chemical resistance of materials]. Moscow, RAASN, 2001. 248 p. (in Russian)
2. Solomatov V.I. Razvitiye polistrukturnoy teorii kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov [The Development of polystructural theory of composite construction materials]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture]. 1985. No. 8. Pp. 26–30. (in Russian)
3. Selyaev V.P., Neverov V.A., Kupriyashkina L.I. Vliyanie tseolitsoderzhashchikh napolniteley na prochnost' i poristost' tsementnykh kompozitov [Influence fillers contain zeolite on strength and porosity of cement composites]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2014. No. 6. Pp. 36–44. (in Russian)
4. Sedova A.A., Ivanov V.M., Selyaev V.P., Osipov A.K., Kupriyashkina L.I. Izuchenie protsessov povrezhdeniya tsementnogo kamnya rastvorami karbonovykh kislot [Study of damage processes of cement stone with solutions of carboxylic acids]. Vestnik Mosk. un-ta. Ser. 2. Khimiya [Herald Moscow University]. 2014. T. 55. No. 5. Pp. 296–301. (in Russian)
5. Selyaev V.P., Sedova A.A., Kupriyashkina L.I., Osipov A.K. Izuchenie protsessov povrezhdeniya tsementnogo kamnya, napolnennogo tseolitsoderzhashchey porodoy, rastvorami khloristovodorodnoy kisloty [Study of damage process of cement stone, filled with zeolite-containing rocks, solutions of hydrochloric acid]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2014. No. 7. Pp. 32–38. (in Russian)
6. Polyudova S.V., Kolomiet V.I., Solomatov V.I. Tsementotseolitovye kompozity [Cementozeolite composites]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 1995. No. 3. Pp. 41–46. (in Russian)
7. Moskovin V.M., Ivanov A.M., Alekseyev S.N. Korroziya betona i zhelezobetona, metody ikh zashchity [Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection]. Moscow, Stroyizdat, 1980. 533 p. (in Russian)
8. Moebeimoghadam B., Dianaat S.N. Evolution of the corrosion and strength of exposed to sulfate solution. International Journal of Civil Engineering and Technology. 2012. Vol. 3, Iss. 2. Pp. 198–206.

9. Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin [Quick reference physico-chemical variables]. Saint-Petersburg, 2003. 240 p. (in Russian)
 10. Taylor Kh.F. Khimiya tsementa [Cement Chemistry]. Moscow, Stroyizdat, 1998. 520 p. (in Russian)
 11. Rakhimbaev Sh.M. Protsessy kol'matatsii pri khimicheskoy korrozii tsementnykh sistem. Fizicheskaya model' [The Process of mudding the chemical corrosion of cement systems. Physical model]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 2013. No. 4. Pp. 30–32. (in Russian)
 12. Rakhimbaev Sh.M. Kinetika protsessov kol'matatsii pri khimicheskoy korrozii tsementnykh sistem [Kinetics of clogging in chemical corrosion of cement systems]. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 2012. No. 6. Pp. 16–17. (in Russian)
-

УДК 691.542.002.3

Л.В. ИЛЬИНА, Г.И. БЕРДОВ, Н.О. ГИЧКО

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ДИСПЕРСНЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК НА ПРОЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

Введение дисперсных минеральных добавок приводит к повышению прочности цементного камня как при его твердении в нормальных условиях, так и после тепло-влажностной обработки. При этом оптимальное содержание известняка составляет 1 %, диопсида – 7 %. При использовании комплексной добавки (известняк, диопсид) наибольший эффект достигается при содержании в ней диопсида более 60 % и ее количестве 7 %.

Ключевые слова: портландцемент, прочность цементного камня, минеральная добавка, диопсид, известняк.

При изготовлении цементных строительных материалов (строительного раствора и особенно бетона) минеральные наполнители используются достаточно широко [1–4]. Принципиальных различий в составе и структуре продуктов гидратации цемента в цементном камне, растворе или бетоне не отмечено [5].

Применение дисперсных минеральных добавок позволяет в значительной мере реализовать потенциальные возможности портландцемента, что обусловливает повышение важнейших свойств композиционных цементных материалов. Во многих случаях введение таких добавок обеспечивает сокращение расхода дорогостоящих вяжущих веществ [1–4].

Эффективное использование дисперсных минеральных добавок зависит от химического состава, дисперсности и их количества. Добавки вводятся в количестве от долей до десятков процентов от массы цемента, при этом их ввод не всегда является достаточно обоснован.

Влияние минеральных добавок обусловлено тем, что они:

1. Воздействуют на процесс гидратационного твердения портландцемента;
2. Препятствуют распространению в нем микротрещин при действии внешнего напряжения;
3. Вызывают перераспределение механического напряжения между частицами добавки и цементным камнем; при этом существенно, чтобы модуль упругости материала добавки был выше, чем у искусственного камня;
4. Микроармируют структуру цементного камня;
5. Могут быть подложками для кристаллизации образующихся гидратных фаз.

Воздействие по пункту 2 оказывают все вводимые добавки независимо от их химического состава и дисперсности. По пункту 4 влияние имеют добавки с волокнистой структурой, что встречается достаточно редко. При учете воздействия по пунктам 1 и 3 следует рассматривать твердость мате-

риалов, которая коррелирует с модулем упругости. Целесообразно, чтобы модуль упругости (т.е. и твердость) добавки был больше чем у цементного камня. Воздействие по пунктам 1 и 5 проявляется интенсивнее, если по типу химических связей, составу, строению кристаллической решетки, удельной энергии образования материала (минеральных) добавки близок к соответствующим характеристикам минералов цемента.

Оценка оптимального количества добавки может быть осуществлена с учетом представлений о плотнейшей упаковке частиц в структуре цементного камня [6]. Комплексные минеральные добавки, содержащие несколько компонентов в составе цементных материалов, могут оказывать взаимное влияние, усиливая или ослабляя действие индивидуальных компонентов.

В данной работе исследован портландцемент производства ООО «Искитимцемент» (Новосибирская область) марки ПЦ 400 Д-20. Минеральный состав его, мас. %: C_3S – 50–55, C_2S – 18–22, C_3A – 7–11, C_4AF – 12–15. Удельная поверхность 300 м²/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.

В качестве дисперсных минеральных добавок в работе использовались диопсид и известняк. Эти добавки, введенные в оптимальных количествах, обеспечивают повышение прочности цементного камня, в том числе при высокой дисперсности цемента [6]. Они существенно отличаются по составу и свойствам. Основным компонентом известняка является оксид кальция. Диопсид – это силикат магния и кальция ($CaO \cdot MgO \cdot 2SiO_2$). Он имеет твердость по шкале Мооса, равную 7. Твердость известняка (кальцита), равная 3, уступает минералам цементного камня.

Диопсидовый микронаполнитель – это измельченная вмещающая порода-отход от переработки флогопитовых руд Буготакского месторождения (Иркутская область), известняковая мука – измельченная порода, полученная от ЗАО «Искитимский известняковый карьер». Химический состав добавок приведен в табл. 1.

Таблица 1. Химический состав минеральных добавок, мас. %

Добавка	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	Na_2O	K_2O	TiO_2	П.п.п.
Диопсид	56,5	25,9	15,8	1,0	0,7	0,1	0,1	0,1	0,6
Известняк	0,5	54,7	0,5	0,2	0,1	–	–	–	40,4

Истинная плотность (кг/м³) данных добавок составляла: диопсид – 3300, известняк – 2600.

При оценке межфазового взаимодействия минеральной добавки и цементной матрицы большую роль играет дисперсность добавок. Их гранулометрический состав определен на лазерном анализаторе дисперсности типа PRO-7000 фирмы Seishin Enterprice Co., LTD, Япония. Показатели дисперсности исследуемых добавок приведены в табл. 2.

Добавки вводились в количестве 1, 3, 5, 7, 9 и 11 % от массы цемента, при этом использовались как отдельно диопсид и известняк, так и комп-

Таблица 2. Показатели дисперсности минеральных добавок по результатам гранулометрического анализа

Показатель	Диопсид	Известняк
Средний размер частиц, мкм	27,0	12,3
Удельная поверхность, м ² /кг	393	470
Объемная доля частиц с размерами менее 4 мкм, %	16,3	12,3
Объемная доля частиц с размерами менее 16 мкм, %	31,9	49,3
Объемная доля частиц с размерами менее 32 мкм, %	46,9	78,6

лексные добавки, состоящие из известняка и диопсида при соотношении диопсид/известняк – 1/2, 1/1, 2/1. Портландцемент смешивали с указанными добавками в шаровой мельнице в течение 1,5 ч.

Образцы цементного камня для определения предела прочности имели размеры 20×20×20 мм. Твердение осуществлялось как в нормальных условиях (первые сутки – над водой, последующие 27 сут – во влажной среде при 20 °C) в течение 1, 3, 7 и 28 сут, так и в условиях тепловлажностной обработки (ТВО). ТВО проводилась по режиму: подъем температуры в течение 3 ч, выдержка при температуре 90 °C в течение 6 ч, снижение температуры в течение 2 ч.

Изменение прочности цементного камня в зависимости от количества вводимой добавки и от состава добавки приведено в табл. 3.

Таблица 3. Влияние состава и количества комплексной минеральной добавки на прочность при сжатии цементного камня, МПа

Условия твердения	Продолжительность, сут	Количество комплексной добавки, % от массы портландцемента						
		0	1	3	5	7	9	11
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Известняк (100 %)</i>								
ТВО	–	56,2	64,7	64,0	62,2	53,1	52,6	51,3
Нормальные условия	1	10,6	13,3	13,1	12,8	10,2	11,0	11,5
»	3	18,1	27,2	26,9	25,3	24,5	22,2	21,4
»	7	33,6	42,3	41,7	40,9	35,8	36,4	34,4
»	28	62,7	74,8	73,4	70,9	68,5	64,9	60,2
<i>Известняк 2 части (66,6 мас. %), диопсид 1 часть (33,3 мас. %)</i>								
ТВО	–	56,2	64,8	64,8	63,0	52,7	52,6	52,0
Нормальные условия	1	10,6	13,0	13,4	13,1	11,7	11,2	11,3
»	3	18,1	23,7	27,3	24,4	23,8	22,0	21,0
»	7	33,6	40,6	42,2	40,5	38,2	37,2	35,2
»	28	62,7	70,8	75,7	74,3	70,8	68,5	63,4
<i>Известняк 1 часть (50 мас. %), диопсид 1 часть (50 мас. %)</i>								
ТВО	–	56,2	62,0	65,3	65,5	65,5	60,4	58,3

Влияние комплексных дисперсных минеральных добавок на прочность...

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Нормальные условия	1	10,6	12,3	14,1	12,8	12,8	12,6	11,0
»	3	18,1	22,0	24,1	23,5	23,5	23,0	18,6
»	7	33,6	39,9	43,6	43,0	42,6	42,3	36,0
»	28	62,7	70,6	77,1	75,0	75,0	75,2	63,7

Известняк 1 часть (33,3 мас. %), диопсид 2 части (66,6 мас. %)

TBO	—	56,2	62,5	65,1	67,4	75,3	71,2	67,0
Нормальные условия	1	10,6	13,0	13,0	13,7	15,0	14,0	11,8
»	3	18,1	21,1	22,1	23,8	26,8	25,3	20,3
»	7	33,6	37,4	40,9	44,3	50,3	44,1	38,5
»	28	62,7	70,8	74,7	79,0	83,8	80,2	72,8

Диопсид (100 %)

TBO	—	56,2	64,0	67,7	70,8	77,1	71,8	67,5
Нормальные условия	1	10,6	13,0	13,3	13,8	16,3	14,9	12,2
»	3	18,1	21,2	22,5	24,2	27,6	26,0	21,8
»	7	33,6	38,0	41,7	44,0	51,2	46,4	39,3
»	28	62,7	71,4	75,0	80,1	86,8	81,7	74,6

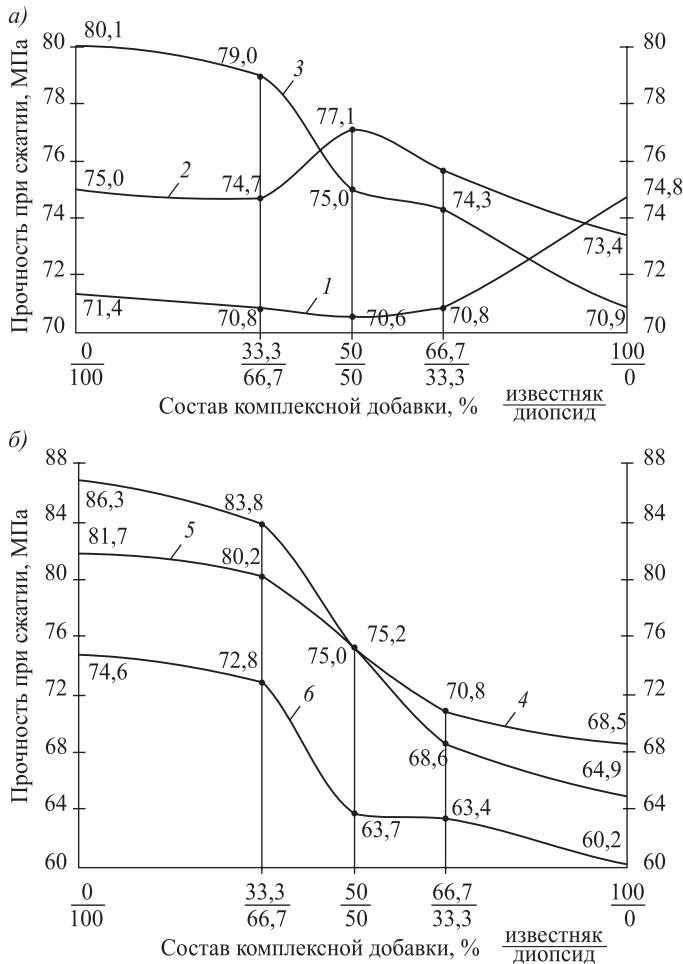
Влияние соотношения компонентов в составе комплексной добавки (известняк/диопсид) на прочность при сжатии цементного камня после 28 сут твердения в нормальных условиях представлено на рисунке.

Полученные результаты показывают, что введение известняка в количестве 1–5 % от массы цемента повышает прочность цементного камня после ТВО. После твердения в нормальных условиях увеличение прочности происходит при введении известняка в количестве 1–9 %. Дальнейшее увеличение содержания вводимой добавки приводит к снижению прочности цементного камня, четко прослеживается оптимальное количество добавки известняка 1 мас. %. При введении добавки диопсида в количестве 1–11 % во всех случаях наблюдается повышение прочности цементного камня. Оптимальная добавка диопсида составляет 7 % от массы цемента.

Введение комплексной добавки, содержащей 33, 50 или 67 % диопсида, приводит к увеличению прочности цементного камня по сравнению с бездобавочным состоянием или содержанием только добавки известняка.

Существенная роль диопсида в составе комплексной добавки проявляется при его содержании не менее 1/3 состава и количества вводимой добавки не менее 5 %. При малом содержании вводимой комплексной добавки (1–3 %) диопсид существенно не влияет на прочность цементного камня. Более того, при количестве добавки 1 % повышение прочности цементного камня отмечается только при введении известняка.

Таким образом, наибольшие значения механической прочности цементного камня как после твердения в нормальных условиях в тече-



Влияние количества комплексной добавки на прочность цементного камня при сжатии цементного камня при введении добавки в количестве 1–5 мас. % (а) и 7–11 мас. % (б)

I – 1 мас. %; 2 – 3 мас. %; 3 – 5 мас. %; 4 – 7 мас. %; 5 – 9 мас. %;
6 – 11 мас. %

ние 28 сут, так и после тепловлажностной обработки достигаются при введении 7 % дисперсного диопсида. Вместе с тем эффект упрочнения сохраняется при замене 1/3 части диопсида в составе добавки дисперсным известняком. Это имеет важное значение, так как вследствие высокой твердости диопсида его измельчение является энергозатратным процессом.

Увеличение содержания известняка в составе комплексной добавки нецелесообразно.

Таким образом, при использовании комплексных минеральных добавок к цементу следует учитывать соотношение в них элементов. Введение оптимального количества (7 %) дисперсного диопсида или комплексной добавки, содержащей 67 % диопсида и 33 % известняка, повышает прочность цементного камня на 35–40 % как при твердении в течение 28 сут в нормальных условиях, так и после тепловлажностной обработки. Замена в составе

минеральной добавки трудно измельчаемого и менее распространенного диопсида на 30–35 % известняковой мукой обеспечивает снижение энергоемкости получения добавки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горчаков Г.И., Боженов Ю.М. Строительные материалы. М.: Стройиздат, 1986. 688 с.
2. Добавки в бетон: справ. пособие: пер. с англ. / под ред. В.С. Рамачадрана. М.: Стройиздат, 1988. 575 с.
3. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Битцер А.В., Урханова Л.А. Эффективность применения золы-уноса Гусиноозерской ГРЭС в составе цементов низкой водопотребности // Строит. материалы. 2011. № 7. С. 76–77.
4. Лесовик В.В. Повышение эффективности вяжущих за счет использования наномодификаторов // Строит. материалы. 2011. № 12. С. 60–62.
5. Uchikawa Hiroshi. Similarities and discrepancies of hardened cement paste, mortar and concrete from the standpoints of composition and structure // J. Res, Onoda Cem. Co. 1988. Vol. 40, No. 119. P. 87–121.
6. Бердов Г.И., Зырянова В.Н., Ильина Л.В., Никоненко Н.И., Сухаренко В.А. Межфазное взаимодействие и механическая прочность композиционных вяжущих материалов. Ч. 2: Цементные материалы // Техника и технология силикатов. 2014. № 4. С. 2–8.

Ильина Лилия Владимировна, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Бердов Геннадий Ильич, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Гичко Николай Олегович, студ.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 24.12.16

Il'ina Liliya Vladimirovna, DSc, Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Berdov Gennadiy Il'ich, DSc, Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Gichko Nikolay Olegovich, Student

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

INFLUENCE OF MINERAL COMPLEX DISPERSE ADDITIONS TO THE STRENGTH OF CEMENT STONE

Introduction of dispersed mineral supplementation leads to increase in strength as the cement paste during its hardening under normal conditions and after heat and humidity treatment. Thus limestone optimum content is 1 %, diopside – 7 %. When using complex additives limestone - diopside greatest effect is achieved when the content of the diopside in it more than 60 % and its amount of 7 %.

Keywords: portland cement, cement paste strength, mineral supplement, diopside, limestone.

REFERENCES

1. Gor chakov G.I., Bozhenov Yu.M. Stroitel'nye materialy [Construction materials]. Moscow, Stroyizdat, 1986. 688 p. (in Russian)

2. Dobavki v beton: spravochnoe posobie [Concrete admixtures. Handbook]. Moscow, Stroyizdat, 1988. 575 p. (in Russian)
3. Khozin V.G., Khokhryakov O.V., Bittser A.V., Urkhanova L.A. Effektivnost' primeneniya zoly-unosa Gusinoozerskoy GRES v sostave tsementov nizkoy vodopotrebnosti [The effectiveness of the ash-unosa Gusinoozerskoy GRES composed cements low water]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2011. No. 7. Pp. 76–77. (in Russian)
4. Lesovik V.V. Povyshenie effektivnosti vyazhushchikh za schet ispol'zovaniya nanomodifikatorov [Improvement of efficiency of binders using nanomodifiers]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2011. No. 12. Pp. 60–62. (in Russian)
5. Uchikawa Hiroshi. Similarities and discrepancies of hardened cement paste, mortar and concrete from the standpoints of composition and structure. J. Res, Onoda Cem. Co. 1988. Vol. 40, No. 119. Pp. 87–121.
6. Berdov G.I., Zyryanova V.N., Il'ina L.V., Nikonenko N.I., Sukharensko V.A. Mezhfaznoe vzaimodeystvie i mekhanicheskaya prochnost' kompozitsionnykh vyazhushchikh materialov. Chast' 2: Tsementnye materialy [Interfacial interactions and the mechanical strength of composite cementitious materials. Part 2. Cement Materials]. Tekhnika i tekhnologiya silikatov [Technique and technology of silicates]. 2014. No. 4. Pp. 2–8. (in Russian)

УДК 691.327 : 666.948.4

К.П. ГУСЕВ, З.А. КОРОТАЕВА, В.А. ПОЛУБОЯРОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОГНЕУПОРНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ СИЛИКАТНОГО ВЯЖУЩЕГО МАТЕРИАЛА И ОТХОДОВ КЕРАМИКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Побочный продукт любой промышленности – вторичное сырье, которое возможно использовать при производстве строительных материалов. Предлагается метод вовлечения отходов металлургии для получения жаропрочных строительных материалов с повышенными физико-механическими характеристиками и малым линейным ростом. Исследования показали, что используя бой динасовых и шамотных изделий в качестве наполнителя и ультрадисперсные вяжущие на основе модифицированных силикатов натрия или модифицированных оксидов алюминия, можно получать изделия прочностью до 37 МПа с жаростойкостью более 1600 °C, что значительно выше, чем у изделий на основе цементных вяжущих.

Ключевые слова: жаропрочные бетоны, модифицированные силикатные и алюмооксидные вяжущие, промышленные отходы, ультрадисперсные модифицирующие добавки.

Проблема жаростойких строительных материалов особенно остро стоит для конструкций и сооружений, длительно испытывающих воздействие высоких температур, а также конструкций, являющихся несущими (к примеру, при пожарах в зданиях температуры достигают 900 °C). При нагреве бетона, изготовленного на портландцементе, происходят процессы дегидратации Ca(OH)₂ и разложения гидросиликатов и гидроалюминатов кальция, образовавшихся в процессе твердения цемента. В результате прочность бетона значительно уменьшается, а оксид кальция в последующем под воздействием влаги гидратируется.

Для придания таким бетонам стойкости к действию высоких температур в его состав вводят тонкодисперсные добавки, содержащие активный аморфный кремнезем, который способен связывать оксид кальция при температуре 700–900 °C благодаря реакциям в твердом состоянии, но такая операция требует дополнительных затрат. В иных случаях применяют пемзу, золу ТЭС, шамот, доменный гранулированный шлак. В качестве вяжущих используют жидкое стекло, глиноземистый и высокоглиноземистый цементы, периклазовый цемент.

По степени огнеупорности жаростойкие бетоны разделяют на высоко-огнеупорные (огнеупорность выше 1770 °C); огнеупорные (1580–1770 °C) и жароупорные (ниже 1580 °C). Установлены классы по прочности на сжатие (B1 – B40 – от 1 до 40 МПа соответственно).

Требует модернизации и возведение промышленных печей, где используются огнеупорные материалы с термостойкостью 100 циклов и более (иногда по условиям эксплуатации – ограничение в 10–20 циклов). Замена

дорогостоящих огнеупорных материалов на дешевые, изготовленные на основе вторичного сырья и твердеющих вяжущих, с требуемыми термостойкостью и жаростойкостью, позволит отказаться от дорогих глиноземистых цементов и увеличить количество циклов их работы [1, 2]. Утилизация керамических отходов металлургических производств (огнеупорного лома) снизит антропогенную нагрузку [3] на окружающую природную среду, занятую этими отходами, а также даст возможность получить экономичную продукцию различного назначения (огнеупоры, строительные конструкционные, отделочные материалы) по конкурентным ценам.

В патенте [4] изложена методика изготовления огнеупорных строительных материалов на основе отходов промышленных печей смоломагнезитового цеха (СМЦ) ОАО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат», где в качестве конструкционного и теплоизоляционного материала часто применяют высокотемпературную керамику. На площадке СМЦ накоплено более 500 тыс. т огнеупорного лома, который распределяется по следующим видам [5], %:

- шамот – 50;
- кварцитовый, динасовый – 30;
- муллитокорундовый, корундовый – 5;
- хромитовый, хромитопериклазовый – 5;
- периклазоуглеродистый – 10.

Таким образом, около 80 % общей массы боя огнеупорного лома составляют шамот и динас, которые могут быть использованы при изготовлении огнеупорных изделий [1].

Экспериментальная часть. Было выбрано исходное вторичное сырье, на основе которого проводились эксперименты по получению огнеупоров, – бой изделий из шамота и динаса СМЦ.

Бой шамотного кирпича содержит 18–45 % Al_2O_3 и до 85 % SiO_2 , поэтому изделия из шамота могут служить в условиях воздействия как основных, так и кислых шлаков. Бой динаса содержит 80–93 % SiO_2 и отличается резко выраженным кислым характером. Динас успешно применяется в ряде обжиговых печей, если температуры высоки для шамотных изделий.

Огнеупоры из вторичного сырья изготавливались с применением двух типов ультрадисперсных вяжущих материалов [5–7] на основе:

1) растворов силикатов натрия с модулем 2,4–3,5 (модуль – отношение $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$), плотностью 1,4–1,5 г/см³ с добавкой микрокремнезема в качестве модификатора [5];

2) α -оксида алюминия, модифицированного солями алюминия [6–8].

Для получения первого типа вяжущего готовили так называемую водно-керамическую вяжущую суспензию (ВКВС). ВКВС – это смесь силиката натрия и микрокремнезема. Соотношение компонентов ВКВС зависит от модуля, плотности силиката натрия и от свойств микрокремнезема, подбирается экспериментально.

Микрокремнезем (отход производства ферросилиция, Кузнецкий завод ферросплавов, г. Новокузнецк) – это пыль-унос, образующаяся при выплавке ферросилиция. Она состоит из частиц сферической формы разного размера, образующих своеобразные агрегаты. Средний размер частиц равен 3,0 мкм,

а размер агрегатов после вылеживания может достигать 17,0 мкм. Состав пыли-уноса сильно варьируется. Для изготовления образцов огнеупоров применяли микрокремнезем с удельной поверхностью 9,3 м²/г следующего состава, %: SiO₂ – 92,8; CaO – 1,12; MgO – 1,28; Al₂O₃ – 0,85; Fe₂O₃ – 1,76; C – 0,56; остальное – примеси.

Для получения второго типа вяжущего использовали глинозем (ГОСТ 30558–98 «Глинозем металлургический. Технические условия» – это α -Al₂O₃ с содержанием 5 % γ -фазы), обработанный в шаровой мельнице совместно с оксихлоридом циркония [5–7] в течение 72 ч. Соотношение глинозема и ZrOCl₂ · 8H₂O составляло 10 : 1; для создания необходимой влажности шихты и поддержания требуемого pH в смесь после обработки в мельнице добавляли 0,1%-й раствор соляной кислоты.

Огнеупоры из динаса, шамота и модифицированного силикатного вяжущего получали методом статического прессования с использованием пресса ДО-242 при оптимальном давлении 30–39 МПа. При этом давлении у образцов не наблюдалось дефектов (скалываний, расслоений). Огнеупоры из шамота и модифицированного алюмооксидного вяжущего получали методом виброформования.

Получение огнеупоров из динаса. Согласно ГОСТ 4157–79 «Изделия динасовые», кирпичи из вторичного сырья могут применяться в качестве огнеупорных изделий, если удовлетворяют ряду физико-химических требований: жаростойкость, прочность и т.д.

Примерный состав образцов, %: динас – 80; жидкое стекло М-2,7 – 13; микрокремнезем – 6,5; пластификатор – 0,1; вода – 9,5.

После прессования изделия выдерживали на воздухе в течение 5–6 ч для набора прочности до 0,5–0,6 МПа, далее проводили термическую обработку при температуре 250 °C в течение 4 ч для ускорения химических реакций и достижения окончательной прочности и влагостойкости. Были получены блоки (380×130×120 мм) и кирпичи (150×130×65 мм) плотностью 2 г/см³ (рис. 1).

Установлены оптимальные размеры частиц для изготовления изделий: сочетание фракции 1,5–5 мм и фракции ниже 1,5 мм в соотношении 3:1, количество ВКВС – 10,6 мас. %, соотношение силиката натрия к микрокремнезему – 3:2 мас. %.

Получение огнеупоров из шамота. Образцы с использованием модифицированного силикат-



Рис. 1. Блок и кирпич из динаса (плотность 2 г/см³, линейные размеры: 380×130×120 и 150×130×65 мм), термообработка 250 °C

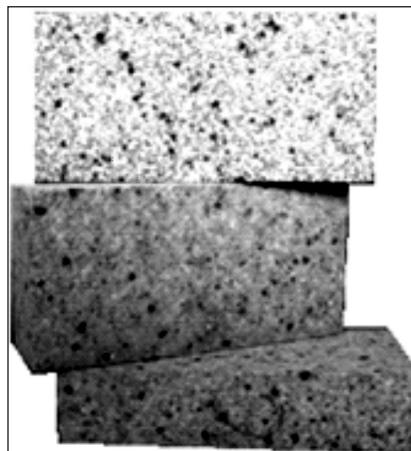


Рис. 2. Образцы из шамота ($235 \times 116 \times 65$ мм), термообработка 1200°C , 4 ч (цвет образцов может меняться от белого до коричневого с вкраплениями и зависит от цвета наполнителя – боя шамота)

ногого вяжущего изготавливали по методике, представленной выше для образцов из динаса.

Состав шихты для образцов с использованием модифицированного алюмооксидного вяжущего: 100 мас. % связки; 270 мас. % наполнителя (шамота); 0,1%-й раствор соляной кислоты до влажности всей шихты не более 11 %. Шихту помещали в разборную стальную форму, сверху устанавливали пригруз весом 20 кг, формовали на вибростоле при амплитуде 0,5–1 мм в течение 30 с. Фракционный состав наполнителя, влажность шихты, условия виброформования необходимо подбирать экспериментально для требуемой плотности изделия. Внешний вид полученных образцов представлен на рис. 2.

Проведение испытаний.

Образцы (из динаса на силикатном вяжущем и шамота – на алюмооксидном) испытывали в соответствии со стандартными методиками: на огнеупорность (ГОСТ 4069–69 «Огнеупоры и огнеупорное сырье. Методы определения огнеупорности»), прочность при сжатии (ГОСТ 25714–83 «Контроль неразрушающий. Акустический звуковой метод определения открытой пористости, кажущейся плотности, плотности и предела прочности при сжатии огнеупорных изделий») и геометрическую стабильность (ГОСТ 427–75, 5402.1–2000 «Изделия огнеупорные с общей пористостью менее 45 %». Метод определения остаточных изменений размеров при нагреве) – в Западно-Сибирском испытательном центре (аттестат аккредитации испытательной лаборатории № РОСС RU.0001.21 АЯ07). Свойства огнеупоров соответствуют показателям ГОСТ 4157–79 и ГОСТ 390–96 «Изделия огнеупорные шамотные и полукислые общего назначения и массового производства» (табл. 1).

Для проведения испытаний на морозостойкость и водопоглощение в лаборатории ИЗОС кафедры ИПЭ НГТУ использовались образцы из динаса на силикатном вяжущем и образцы из шамота на алюмооксидном вяжущем.

Таблица 1. Характеристики образцов из динаса и шамота на силикатном вяжущем

Показатель	Кажущаяся плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	Прочность на сжатие, МПа	Огнеупорность, $^{\circ}\text{C}$, ГОСТ 4069–69	Дополнительный линейный рост, %, ГОСТ 5402–81
Динасовый экспериментальный	1,96	24	1680	0,4
ГОСТ 4157–79	2,0	15	1580	0,5
Шамотный экспериментальный	1,98	31	>1500	0
ГОСТ 390–96	Не нормируется	23	1630	0,5

Испытания осуществлялись по ГОСТ 7025–91 «Кирпич и камни керамические и силикатные. Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости», в котором морозостойкость оценивается, как способность выдерживать определенное количество циклов замораживания и размораживания в состоянии максимального насыщения влагой.

Согласно ГОСТ 379–95 «Кирпич и камни силикатные. Технические условия», водопоглощение образцов должно быть не менее 6 %, а по морозостойкости следует изготавливать изделия марок F15, F25, F35, F50 (где цифра после «F» – количество циклов замораживания, которое выдерживает изделие), марка по морозостойкости лицевых изделий должна быть не менее F25.

Определение водопоглощения. Из образцов-кирпичей были вырезаны образцы-кубы со стороной 65 мм. В испытаниях использовались по 3 образца-куба из шамотного (Ш-1 – Ш-3) и динасового (Д-1 – Д-3) кирпичей. Дополнительные образцы Ш-4 – Ш-8 и Д-4 – Д-8 служили для контроля и прочностных испытаний.

Испытания проводились в помещении лаборатории с температурой воздуха (20 ± 5) °C. Водонасыщенные образцы высушивались в сушильном шкафу при температуре 105 °C до постоянной массы.

Проведение испытания:

- 1) образцы укладывались с зазорами между ними не менее 2 см в сосуд с водой при температуре (20 ± 5) °C;
- 2) выдерживались в воде 48–49 ч;
- 3) насыщенные водой образцы вынимались из воды, обтирались и взвешивались;
- 4) затем образцы высушивались до постоянной массы.

Водопоглощение (W_i , %) образцов по массе

$$W_i = \frac{m_{\text{нас}} - m}{m} \cdot 100, \quad (1)$$

где $m_{\text{нас}}$ – масса образца, насыщенного водой в последнем цикле испытаний, г;

m – масса образца, высшенного до постоянной массы.

За значение водопоглощения изделий W принимают среднее арифметическое результатов определения водопоглощения всех образцов (W_i), рассчитанное с точностью до 1 %. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты испытаний на водопоглощение

Кирпич	Образец, №	Масса сухого образца постоянной массы m , г	Масса образца после цикла водонасыщения $m_{\text{нас}}$, г				Водопоглошение W_i , %	Водопоглощение W , %
			1	2	3	4		
Шамотный	Ш-1	343,8	377,9	380,5	382,4	382,6	11,29	10,0
	Ш-2	301,5	325,2	326,2	327,9	328,0	8,79	
	Ш-3	286,9	310,8	310,9	311,0	311,1	8,44	
Динасовый	Д-1	377,8	417,4	417,5	417,6	417,6	10,54	11,0
	Д-2	449,4	497,0	497,2	497,9	498,0	10,82	
	Д-3	352,8	390,3	390,7	391,1	391,3	10,92	

Примечание. В норме водопоглощение $W > 6$ %.

Морозостойкость при объемном замораживании определяли с помощью сушильной и морозильной камер, электронных весов, испытательной машины INSTRON 3380.

Контроль морозостойкости проводили по степени повреждений или потере массы на основе десяти образцов, прошедших водонасыщение и по контролю прочности (Ш-1 – Ш-5, Д-1 – Д-5). На образцах фиксировали трещины, сколы ребер, углов и другие дефекты. Замораживание образцов в морозильной камере и оттаивание их в воде осуществляли в контейнерах, зазоры между образцами в которых были не менее 20 мм. Образцы укладывали в один ряд. Температура воздуха в камере от начала до конца замораживания составляла от –15 до –20 °С.

Одно замораживание (4 ч) и оттаивание (2 ч) составляли один цикл, после каждого из которых осматривали образцы и фиксировали появившиеся дефекты. Проведено 25 циклов.

После всех циклов испытаний на образцах не было обнаружено повреждений, трещин и сколов. Результаты контроля массы приведены в табл. 3, где видно, что все образцы набрали вес, а не потеряли его, что, возможно, объясняется возникновением микротрещин в толще материала и большим водонасыщением. В связи с этим потеря массы не оценивалась.

Таблица 3. Результаты изменения масс образцов из шамота и динаса после определения морозостойкости

Кирпич	Образец, №	Масса водонасыщенного образца постоянной массы m , г	Масса образца после последнего цикла заморозки $m_{\text{нас}}$, г	Прибавка массы, %
Шамотный	Ш-1	382,6	388,9	1,6
	Ш-2	328,0	333,8	1,8
	Ш-3	311,1	316,2	1,7
	Ш-4	398,9	403,2	1,1
	Ш-5	367,5	371,4	1,1
Динасовый	Д-1	417,6	422,0	1,1
	Д-2	498,0	502,7	1
	Д-3	391,3	394,8	0,9
	Д-4	507,1	509,0	0,4
	Д-5	416,7	418,3	0,4

Результаты испытаний образцов на сжатие представлены в табл. 4, на диаграммах (рис. 3) показаны кривые нагружения образцов Д-1 и Ш-1.

Образцы Ш-7 – Ш-9, Д-7 – Д-9 не подвергались заморозке и хранились в сухом виде. Остальные образцы после определения морозостойкости были высушены до постоянной массы и отправлены на прочностные испытания.

Потерю прочности ΔR , %, с точностью до 1 % вычисляли по формуле

$$\Delta R = \frac{R_k - R}{R} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где R_k – среднее арифметическое пределов прочности контрольных образцов; R – то же, для образцов, прошедших все циклы замораживания (см. табл. 4).

Таблица 4. Результаты испытания образцов на сжатие

Кирпич	Образец, №	Подвергался испытанию на морозостойкость?	Разрушающая нагрузка P , МПа	Удлинение при сжатии, мм	Длина, мм	Ширина, мм	Площадь, см ²	
Шамотный	Ш-1	Да	42,34	2,203	57,5	54,3	31,23	
	Ш-2	Да	40,85	4,11	58,0	47,5	27,55	
	Ш-3	Да	41,4	4,95	55,0	49,0	26,95	
	Ш-4	Да	49,89	4,39	59,0	55,0	32,45	
	Ш-5	Да	52,46	2,95	56,0	55,0	30,80	
<i>Среднее арифметическое значение прочности образцов Ш-1–Ш-5:</i> $R_{ш} = 45,38$ МПа								
Динасовый	Д-6	Нет	39,58	3,22	56,0	54,5	30,52	
	Д-7	Нет	34,14	3,93	56,0	55,7	31,20	
	Д-8	Нет	37,16	3,88	56,0	55,7	31,20	
	<i>Среднее арифметическое значение прочности образцов Д-1–Д-5:</i> $R_{д} = 21,67$ МПа							
	Д-6	Нет	24,29	3,62	65,0	53,7	34,91	
	Д-7	Нет	23,14	3,51	65,0	53,7	34,91	
	Д-8	Нет	23,65	4,22	65,7	54,0	35,48	
	<i>Среднее арифметическое значение прочности образцов Д-6 – Д-8:</i> $R_{кд} = 23,69$ МПа							

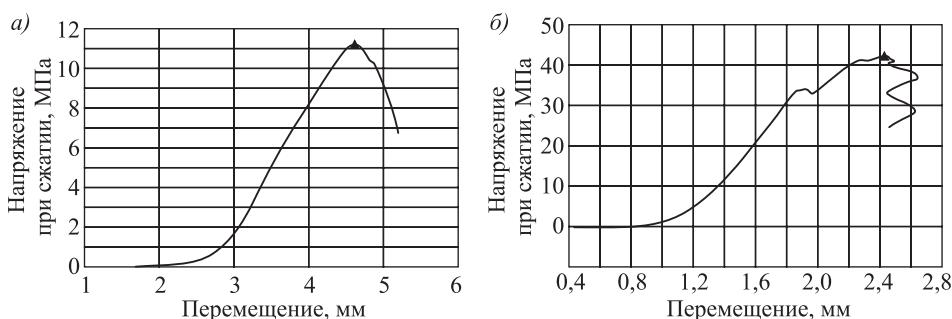


Рис. 3. Диаграмма нагружения образцов Д-1(а) и Ш-1(б) при испытании на прочность при сжатии

Потеря (+) или прирост (-) прочности изделий на основе шамота:

$$\Delta R_{ш} = \frac{R_{кд} - R_{ш}}{R_{ш}} \cdot 100 \% = \frac{36,96 - 45,38}{45,38} \cdot 100 \% = -19,0 \% . \quad (3)$$

То же самое для изделий из динаса:

$$\Delta R_{\text{д}} = \frac{R_{\text{кд}} - R_{\text{д}}}{R_{\text{д}}} \cdot 100 \% = \frac{23,69 - 21,67}{21,67} \cdot 100 \% = 9,32 \%. \quad (4)$$

Заключение. Показана возможность получения высокопрочных жаростойких строительных изделий на основе керамических отходов металлоизделий и ультрадисперсных вяжущих. Огнеупорность изделий из боя динаса составила 1680 °C, а из боя шамота – более 1500 °C, что позволяет отнести изделия по степени огнеупорности к «огнеупорным». Класс прочности изделий из динаса – В24, из шамота – В37, что дает возможность использовать их в качестве несущих строительных материалов.

Малый линейный рост (0–0,5 мм) гарантирует безусадочность получаемых изделий. Водопоглощение всех образцов находится на отметке 10–11 %, что соответствует требованиям ГОСТ ($\geq 6 \%$), изделия способны впитывать и отдавать достаточно влаги при их применении в наружной отделке, препятствовать образованию скоплений воды на своей поверхности.

Испытания на морозостойкость показали, что все образцы не потеряли вес, а набрали его. При этом, внешних дефектов, отслоений и отколов ребер не обнаружено. Прибавка к массе составила для образцов на основе шамота и динаса $\approx 1,1 \%$. Контрольные прочностные испытания показали, что образцы из динаса снизили прочность на 9,32 %, с 23,69 до 21,67 МПа, в то же время, образцы из шамота увеличили ее на 19 % с 36,96 до 45,38 МПа. Набор прочности, возможно, объясняется протеканием в образцах остаточных химических реакций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Черепанов К.А., Динельт В.М., Ливенец В.И. О возможных направлениях утилизации тонкодисперсных отходов металлургической промышленности // Материалы региональной науч.-практ. конф. Новокузнецк-1990. Новокузнецк, 1990. С. 72.
2. Пивинский Ю.Е., Трубицын М.А. Огнеупорные бетоны нового поколения. Бесцементные бетоны // Огнеупоры. 1990. № 8. С. 6–16.
3. Сенкус В.В., Майер В.Ф. Экологические проблемы горнодобывающих предприятий в Кузбассе // ЭКО-Бюллетень ИнЭкА. 2002. № 2(73). 2 с.
4. Пат. 2332386 Российская Федерация. МПК C04B35/14. Шихта для изготовления огнеупоров и способ получения изделий из нее / Н.З. Ляхов, З.А. Коротаева, В.В. Булгаков, Ф.И. Иванов, В.Н. Комиссаров, А.Н. Бебко, В.Э. Готфрид; заявитель и патентообладатель ООО «Экология – Вторичные ресурсы». № 2006106895/03; заявл. 06.03.2006; опубл. 27.08.2008; Бюл. № 24. 7 с.
5. Полубояров В.А., Иванов Ф.И., Исакова Е.В., Гардер Е.А., Коротаева З.А. Получение огнеупорной керамики путем рециклинга огнеупорного лома // Вестн. Кемеров. гос. ун-та. 2010. № 1. С. 42–44.
6. Черепанов К.А., Черныш Г.И., Динельт В.М., Сухарев Ю.И. Утилизация вторичных материальных ресурсов в металлургии. М.: Металлургия, 1994. 224 с.
7. Пат. 2477452 Российской Федерации. МПК G01B11/02. Способ анализа вяжущего материала на основе оксида алюминия (экспресс-метод) / В.А. Полубояров, З.А. Коротаева, И.А. Паули, Д.И. Исаков; заявитель и патентообладатель Институту

- химии твердого тела и механохимии СО РАН. № 2011135153; заявл. 22.08.11; опубл. 10.03.13; Бюл. № 7. 1 с.
8. Пат. 2214379 Российская Федерация. МПК C04B35/106, C04B35/10, C04B35/622. Способ получения огнеупорной массы (варианты) / В.А. Полубояров, З.А. Коротаева, В.В. Булгаков, Н.З. Ляхов; заявитель и патентообладатель Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН. № 2002114646/03; заявл. 04.06.2002; опубл. 20.10.2003; Бюл. № 3. 4 с.

Гусев Кирилл Петрович, ст. преподаватель; E-mail: k.gusev@corp.nstu.ru
Новосибирский государственный технический университет
Коротаева Зоя Алексеевна, канд. хим. наук, науч. сотрудник;
E-mail: z.korotaeva@ngs.ru
Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск
Полубояров Владимир Александрович, д-р хим. наук, проф., ст. науч. сотрудник;
E-mail: v.a.poluboyarov@ngs.ru
Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН, г. Новосибирск

Получено после доработки 05.12.16

Gusev Kirill Petrovich, Senior Lecturer; E-mail: k.gusev@corp.nstu.ru
Novosibirsk State Technical University, Russia
Korotaeva Zoya Alekseevna, PhD, Scientist; E-mail: z.korotaeva@ngs.ru
Institute of Solid State Chemistry and Mechanical Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia
Poluboyarov Vladimir Aleksandrovich, DSc, Professor, Senior Researcher
Institute of Solid State Chemistry and Mechanical Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF FIREPROOF CONSTRUCTION PRODUCTS ON THE BASIS OF A SILICATE BINDER AND CERAMIC METALLURGICAL WASTES

A waste of any industry – secondary raw materials, which may be used in the manufacture of building materials. Shows technology for producing heat-resistant building materials with improved physical and mechanical characteristics and low linear growth of the ceramic waste (in the production of metals). Tests have shown that using a waste of silica and fireclay bricks as a filler and ultrafine binders based on sodium silicate or aluminum oxide, can be prepared products strength up to 37 MPa and heat resistance over 1600 °C, which is significantly higher than that of classic concrete mixes based on cement binders.

К e y w o r d s: heat-resistant concrete, nano-modified additives, industrial waste, the modified silicate and alumina binders.

REFERENCES

1. Cherepanov K.A., Dinelet' V.M., Livenets V.I. O vozmozhnykh napravleniyakh utilizatsii tonkodispersnykh otkhodov metallurgicheskoy promyshlennosti [The possibility of sending waste disposal fine metallurgical industrial]. Materialy regional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Novokuznetsk-1990 [Materials of regional scientific-practical conference. Novokuznetsk-1990]. Novokuznetsk, 1990. P. 72. (in Russian)

2. Pivinskiy Yu.E., Trubitsyn M.A. Ogneupornye betony novogo pokoleniya. Bestsementnye betony [Refractory concretes new generation. Cement-free concrete]. Ogneupory [Refractory]. 1990. No. 8. Pp. 6–16. (in Russian)
 3. Senkus V.V., Majer V.F. Ekologicheskie problemy gornodobyvayushchikh predpriatiy v Kuzbasse [Environmental problems of mining enterprises in Kuzbass]. EHKO-Byulleten' InEHkA [ECO-Bulletin InEcA]. 2002. No. 2(73). 2 p. (in Russian)
 4. Pat. 2332386 Russian Federation. MPK C04B35/14. Shikhta dlya izgotovleniya ogneuporov i sposob polucheniya izdeliy iz nee [The charge for the manufacture of refractories and a process for preparing articles of]. N.Z. Lyakhov, Z.A. Korotaeva, V.V. Bulgakov, F.I. Ivanov, V.N. Komissarov, A.N. Bebko, V.Eh. Gotfrid; zayavitel' i patentoobladatel' OOO «Ekologiya – Vtorichnye resursy» [The Applicant and the patentee «Ecology – secondary resources» Ltd]. № 2006106895/03; appl. 06.03.2006; publ. 27.08.2008; Bull. No. 24. 7 p. (in Russian)
 5. Poluboyarov V.A., Ivanov F.I., Isakova E.V., Garder E.A., Korotaeva Z.A. Poluchenie ogneupornoj keramiki putem retsiklinga ogneupornogo loma [Getting refractory ceramic by recycling refractory scrap]. Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Kemerovo State University]. 2010. No. 1. Pp. 42–44. (in Russian)
 6. Cherepanov K.A., Chernysh G.I., Dine1't V.M., Sukharev Yu.I. Utilizatsiya vtorichnykh material'nykh resursov v metallurgii [Recycling of secondary material resources in the industry]. Moscow, Metallurgy, 1994. 224 p. (in Russian)
 7. Pat. 2477452 Russian Federation. MPK G01B11/02. Sposob analiza vyazhushchego materiala na osnove oksida alyuminija (ehkspress-metod) [Binder based on the alumina analysis method (express-test)]. V.A. Poluboyarov, Z.A. Korotaeva, I.A. Pauli, D.I. Isakov; zayavitel' i patentoobladatel' Institut khimii tverdogo tela i mekhanokhimii SO RAN [Applicant and the patentee Institute of Solid State Chemistry and Mechanical]. No. 2011135153; appl. 22.08.11; publ. 10.03.13; Bull. No. 7. 1 p. (in Russian)
 8. Pat. 2214379 Russian Federation. MPK C04B35/106, C04B35/10, C04B35/622. Sposob polucheniya ogneupornoj massy (varianty) [A method for producing refractory mass (variants)]. V.A. Poluboyarov, Z.A. Korotaeva, V.V. Bulgakov, N.Z. Lyahov; zayavitel' i patentoobladatel' Institut khimii tverdogo tela i mekhanokhimii SO RAN [Applicant and the patentee Institute of Solid State Chemistry and Mechanical]. No. 2002114646/03; appl. 04.06.2002; publ. 20.10.2003; Bull. No. 3. 4 p. (in Russian)
-

УДК 691.175 : 678.043

Т.А. НИЗИНА, Д.А. АРТАМОНОВ, Д.Р. НИЗИН, А.Н. ЧЕРНОВ,
Д.О. АНДРОНЫЧЕВ

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОТВЕРДИТЕЛЯ НА КЛИМАТИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ*

Приведены результаты испытаний составов полимерных композитов на основе эпоксидных связующих, экспонированных в условиях воздействия натуральных климатических факторов умеренного климата. Выполнен анализ изменения суммарной солнечной радиации и ультрафиолетовых излучений диапазонов А и В в зависимости от сезона климатического воздействия. Определено влияние длительности экспонирования и интенсивности актинометрических параметров на изменение упругопрочностных характеристик полимерных композитов. Установлены коэффициенты экспоненциального уравнения, описывающего изменение относительного предела прочности и удлинения эпоксидных композитов при растяжении.

Ключевые слова: полимерные композиты, эпоксидные связующие, отвердители, длительность экспонирования, актинометрические параметры, предел прочности при растяжении, относительное удлинение.

Полимерные композиционные материалы и покрытия на их основе все чаще находят применение в качестве защитно-декоративных покрытий строительных конструкций, в том числе работающих в условиях воздействия натуральных климатических факторов [1–6]. При этом известно, что одним из главных недостатков полимерных композитов является их достаточно низкая стойкость к действию климатических факторов. Исследования в области старения полимеров [5, 7–15] демонстрируют, что большинство из них существенно деградирует со временем. Старение полимерных материалов происходит под действием агрессивных факторов окружающей среды и сопровождается изменением химической и физической структур. В натурных условиях экспонирования на старение полимеров оказывают одновременное влияние множество факторов: температура и влажность воздуха, солнечная радиация, кислород, загрязняющие вещества и т.д. Сочетание этих факторов зависит от климатической зоны, а их действие носит непостоянный характер в течение всего времени эксплуатации.

Известно, что свойства полимерных композитов, а также их стойкость в процессе экспонирования определяются видом отверждающей системы [4, 6], что делает крайне актуальной оценку климатической стойкости полимерных материалов с выявлением наиболее эффективных отвердителей.

В данной работе при изготовлении полимерных составов использовалась эпоксидная смола ЭД-20 (ГОСТ 10587–84), являющаяся одной из наиболее распространенных во множестве отраслей, в том числе и в строительной. Однако она обладает достаточно высокой вязкостью, что приводит к необхо-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-33-01008).

© Низина Т.А., Артамонов Д.А., Низин Д.Р., Чернов А.Н., Андронычев Д.О., 2017

димости поиска технологических решений, позволяющих повысить подвижность связующих на ее основе.

В качестве отвердителей взяты марки Этал-1440Н, Этал-1460 и Этал-45М производства АО «ЭНПЦ ЭПИТАЛ». Все они относятся к аминному типу, нетоксичны, предназначены для холодного отверждения, что является наиболее целесообразным при применении получаемых составов покрытий для повышения несущей способности и защиты строительных конструкций от агрессивных факторов. Также перечисленные выше отвердители дают возможность получать более низковязкие составы, позволяющие повысить глубину пропитки бетонных оснований строительных конструкций и, как следствие, адгезионную прочность наносимых покрытий.

Этал-1440Н предназначен для отверждения эпоксидных смол и компаундов при температуре не ниже +5 °С, имеющих повышенные требования по теплостойкости. Не содержит летучие вещества и метафенилендиамин, рекомендуется для изготовления компаундов, устойчивых к перепадам температур от -40 до +150 °С. При совмещении с ЭД-20 обладает жизнеспособностью 2,5 ч и теплостойкостью по Мартенсу не менее 150 °С.

Этал-1460 предназначен для отверждения эпоксидных смол при температуре от 0 до +40 °С при любой влажности и под водой. По данным производителя, он обеспечивает высокую адгезию и рекомендуется для изготовления антакоррозионных покрытий, стойких к воздействию воды, кислот и щелочей.

Этал-45М предназначен для отверждения эпоксидных смол при температуре от -7 до +45 °С в условиях любой влажности; при совмещении со смолой ЭД-20 имеет в 3 раза большую жизнеспособность и значительно более низкую (около 60 °С) температуру экзотермической реакции по сравнению с композициями, отверждаемыми полиэтиленполиамином.

Основные показатели эпоксидных композитов в зависимости от вида используемого отвердителя приведены в табл. 1. Установлено, что наибольшей прочностью при растяжении обладает состав на основе отвердителя Этал-45М. Замена Этал-45М на Этал-1440 приводит к снижению прочностных показателей на 10,8 %, на Этал-1460 – на 20,4 %. При этом наибольшее относительное удлинение при максимальной нагрузке (9,77 %) зафиксировано для эпоксидного композита ЭД-20 + Этал-1440Н, наименьшее (8,18 %) – для ЭД-20 + Этал-1460.

Таблица 1. Свойства эпоксидных композитов в исходном состоянии

Показатель	Марка отвердителя		
	Этал-1440Н	Этал-1460	Этал-45М
Плотность, г/см ³	1,63	1,57	1,64
Предел прочности при растяжении, МПа	52,86	47,16	59,28
Относительное удлинение при максимальной нагрузке, %	9,77	8,18	8,62

Натурные испытания исследуемых составов проводились на испытательной площадке Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарева с 1 декабря 2014 г. в течение 12 мес. Контрольными точками для измерения упругопрочных характеристик

ристик образцов были выбраны 45, 90, 180, 270 и 365 сут. Фиксация метеорологических (температура, относительная влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра, осадки), экологических (концентрации загрязняющих веществ) и актинометрических (суммарная солнечная радиация и ультрафиолетовое излучение А (320–400 нм) и В (280–320 нм)) параметров осуществлялась с помощью автоматической станции контроля с частотой соответственно 20 и 10 мин в круглогодичном режиме [16].

Анализ изменения предела прочности исследуемых составов при растяжении показал (рис. 1), что наибольшее, практически монотонное, снижение свойств в течение 180 и 270 сут наблюдается для композитов, отверждаемых соответственно Этал-1460 и Этал-45М. На дальнейших временных этапах зафиксирована стабилизация свойств эпоксидных композитов. К концу исследуемого периода натурного экспонирования прочностные показатели снижаются на 60 % для состава с отвердителем Этал-45М и на 69 % – с Этал-1460.

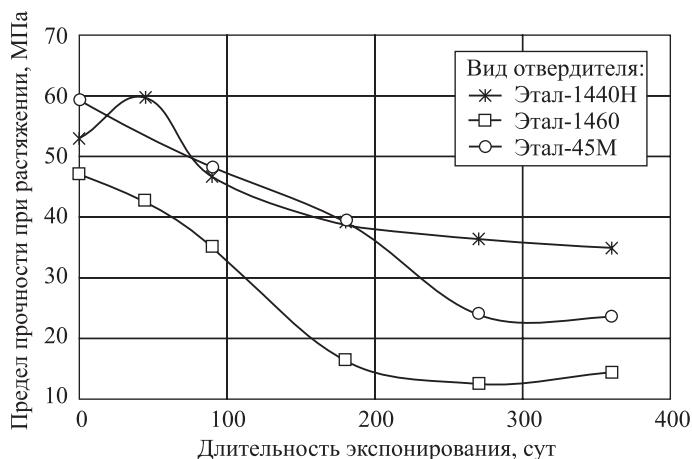


Рис. 1. Изменение предела прочности эпоксидных композитов при растяжении в зависимости от длительности натурного экспонирования

Наибольшая стабильность свойств через 12 мес климатического воздействия в условиях умеренного климата (г. Саранск) отмечена для эпоксидного композита, отверждаемого Этал-1440Н; снижение предела прочности при растяжении в этом случае не превышает 34 %. Кроме того, экспонирование состава ЭД-20 + Этал-1440Н в течение 45 сут приводит к повышению прочностных показателей на 13 %.

Известно, что наибольшее агрессивное воздействие на полимерные композиционные материалы, как правило, оказывает УФ-облучение в интервале длин волн 300–400 нм [5, 7, 8]. Под действием ультрафиолетового излучения разрушаются связи в молекулах полимеров, что является основной причиной негативного влияния солнечной радиации. В работе [17] показано, что наибольшее воздействие солнечная радиация оказывает в диапазоне 280–2800 нм, а в особенности – ее ультрафиолетовая компонента в диапазоне 280–320 нм. Видимая компонента поглощается полимерами, но относительно слабо, и обладает меньшей фотохимической активностью.

Изменение интенсивности актинометрических параметров (суммарной солнечной радиации и ультрафиолетовых излучений диапазона А и В) в течение 12 мес 2014/15 г. представлено на рис. 2. Установлено, что интенсивность суммарного солнечного воздействия и ультрафиолетового излучения диапазона А в весенние, летние и осенние сезоны повышается по сравнению с зимними месяцами соответственно в 5,01–5,08, 6,01–6,12 и 1,8–2,11 раза. Суммарное ультрафиолетовое излучение диапазона В для тех же исследуемых периодов по сравнению с зимним сезоном увеличивается в 15,4, 25,95 и 5,23 раза.

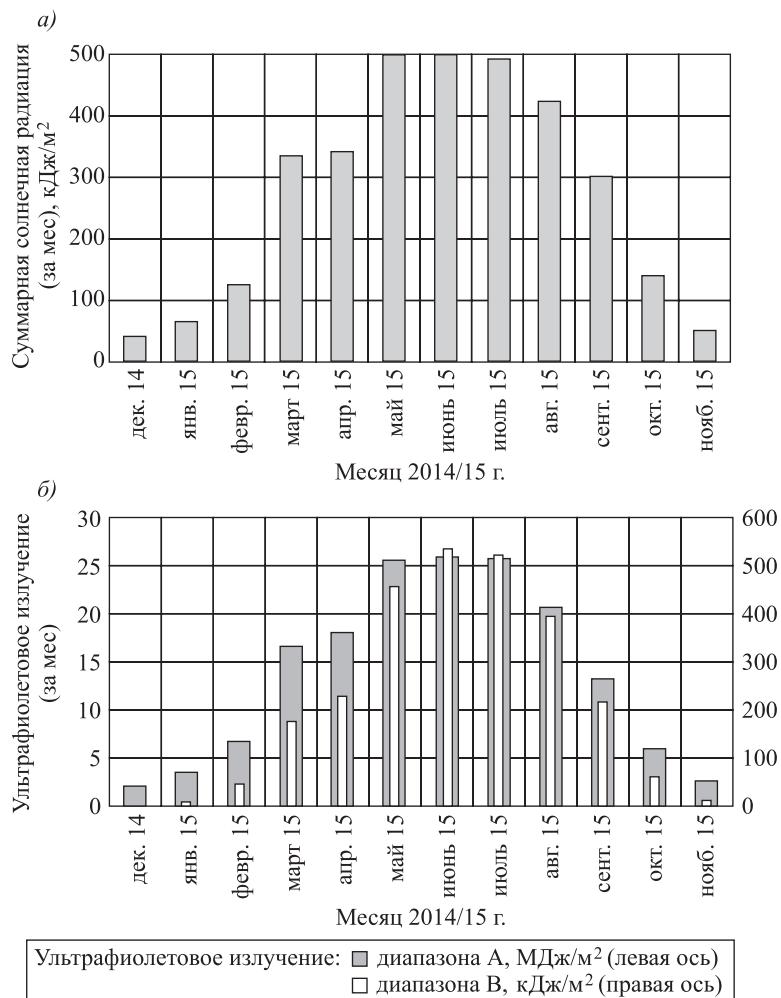


Рис. 2. Изменение актинометрических параметров в зависимости от месяца натурного экспонирования
α – суммарная солнечная радиация; β – ультрафиолетовое излучение

Для описания изменения относительного предела прочности эпоксидных композитов при растяжении в зависимости от длительности экспонирования и актинометрических параметров использовалась экспоненциальная зависимость вида

$$\Delta\sigma_{\text{раст}}^X = \exp(\alpha_X X^{\beta_X}), \quad (1)$$

где α_X , β_X – коэффициенты уравнения, обусловленные составом исследуемого композита;

X – переменный фактор, отождествляемый в зависимости от вида анализируемых кривых с длительностью экспонирования (T , сут), суммарной солнечной радиацией (Q , МДж/м²) или суммарным ультрафиолетовым излучением диапазона А (U_A , МДж/м²), В (U_B , кДж/м²).

Графики, описывающие изменение относительного предела прочности исследуемых составов при растяжении в соответствии с суммарной солнечной радиацией, представлены на рис. 3, а. Подобная зависимость (1) использовалась для описания изменения в процессе натурного климатического воздействия и относительного удлинения эпоксидных композитов при максимальной растягивающей нагрузке (рис. 3, б). Значения коэффициентов аппроксимирующих зависимостей и коэффициентов детерминации R^2 приведены в табл. 2.

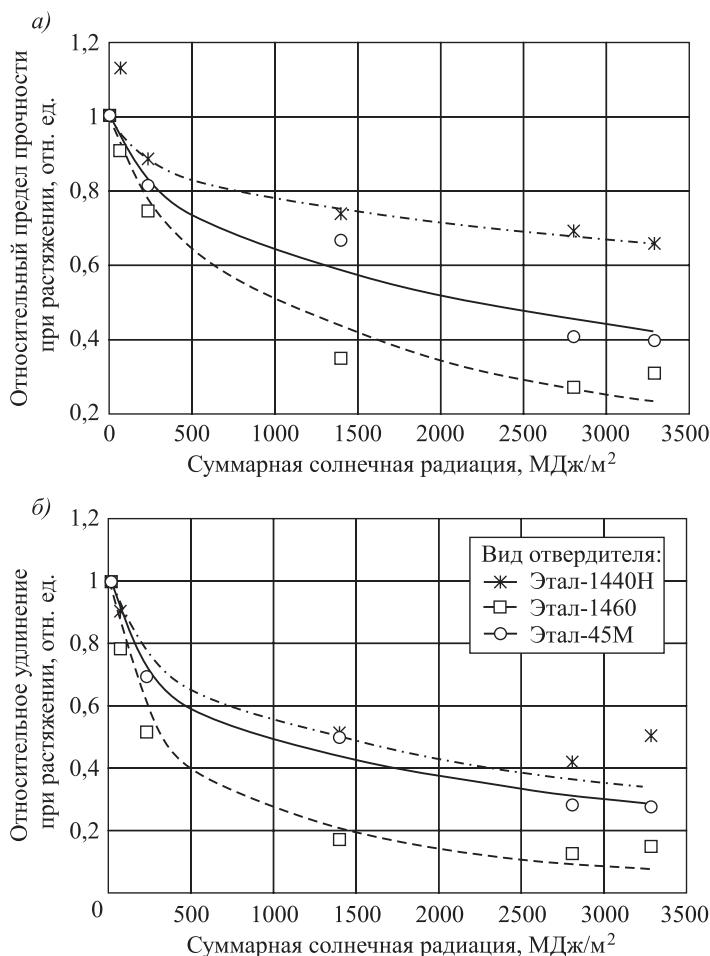


Рис. 3. Изменение относительного предела прочности (а) и относительного удлинения (б) эпоксидных композитов при растяжении в зависимости от интенсивности суммарной солнечной радиации

Таблица 2. Значения коэффициентов уравнения (1)

Отвердитель	Коэффициенты уравнения	α_X	β_X	R^2
<i>Относительный предел прочности при растяжении</i>				
Этал-1440Н	T , сут	$-2,69 \cdot 10^{-3}$	0,876	0,754
	Q , МДж/м ²	$-1,15 \cdot 10^{-2}$	0,444	0,773
	U_A , МДж/м ²	$-4,21 \cdot 10^{-2}$	0,448	0,774
	U_B , кДж/м ²	$-3,78 \cdot 10^{-2}$	0,301	0,858
Этал-1460	T , сут	$-8,97 \cdot 10^{-2}$	1,284	0,925
	Q , МДж/м ²	$-7,96 \cdot 10^{-3}$	0,644	0,975
	U_A , МДж/м ²	$-5,28 \cdot 10^{-2}$	0,649	0,976
	U_B , кДж/м ²	$-1,22 \cdot 10^{-1}$	0,295	0,982
Этал-45М	T , сут	$-1,10 \cdot 10^{-3}$	1,161	0,971
	Q , МДж/м ²	$-8,88 \cdot 10^{-3}$	0,566	0,967
	U_A , МДж/м ²	$-4,65 \cdot 10^{-2}$	0,572	0,967
	U_B , кДж/м ²	$-4,15 \cdot 10^{-2}$	0,380	0,957
<i>Относительное удлинение при растяжении</i>				
Этал-1440Н	T , сут	$-4,89 \cdot 10^{-3}$	1,055	0,989
	Q , МДж/м ²	$-2,33 \cdot 10^{-2}$	0,529	0,995
	U_A , МДж/м ²	$-8,77 \cdot 10^{-2}$	0,533	0,995
	U_B , кДж/м ²	$-1,43 \cdot 10^{-1}$	0,249	0,997
Этал-1460	T , сут	$-5,22 \cdot 10^{-3}$	0,908	0,983
	Q , МДж/м ²	$-3,15 \cdot 10^{-2}$	0,452	0,987
	U_A , МДж/м ²	$-1,49 \cdot 10^{-1}$	0,456	0,987
	U_B , кДж/м ²	$-2,92 \cdot 10^{-1}$	0,226	0,994
Этал-45М	T , сут	$-4,71 \cdot 10^{-3}$	0,970	0,987
	Q , МДж/м ²	$-2,62 \cdot 10^{-2}$	0,477	0,986
	U_A , МДж/м ²	$-1,06 \cdot 10^{-1}$	0,482	0,986
	U_B , кДж/м ²	$-9,56 \cdot 10^{-2}$	0,321	0,981

Из анализа графических зависимостей установлено, что натурное экспонирование эпоксидных композитов сопровождается существенным снижением деформативных характеристик, что свидетельствует об их охрупчивании. Через год натурных испытаний относительное удлинение образцов в зависимости от вида отвердителя уменьшилось на 85, 73 и 49 %, соответственно для композитов, отверждаемых Этал-1460, Этал-45М и Этал-1440Н.

По результатам исследований выявлено, что наиболее высокой стойкостью в условиях воздействия натурных климатических факторов обладает эпоксидный композит на основе эпоксидной смолы ЭД-20 и отвердителя Этал-1440Н. Для данного состава зафиксировано наименьшее снижение

предела прочности и удлинения при растяжении как в абсолютных (см. рис. 1), так и в относительных величинах (см. рис. 3).

Возможность параллельной фиксации актинометрических параметров позволяет оценить влияние интенсивности солнечной радиации и суммарного ультрафиолетового излучения диапазонов А и В на упругопрочностные показатели эпоксидных композитов. Наиболее интенсивное изменение характеристик происходит, как правило, на начальном этапе экспонирования. Последующее воздействие климатических факторов приводит к плавному снижению прочностных и деформативных характеристик исследуемых составов эпоксидных композитов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. М.: Химия, 1982. 232 с.
2. Соломатов В.И., Селяев В.П. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов. М.: Стройиздат, 1987. 264 с.
3. Соломатов В.И., Селяев В.П., Соколова Ю.А. Химическое сопротивление материалов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: РААСН, 2001. 284 с.
4. Хозин В.Г. Усиление эпоксидных полимеров. Казань: Дом печати, 2004. 446 с.
5. Низина Т.А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2007. 258 с.
6. Селяев В.П., Иващенко Ю.Г., Низина Т.А. Полимербетоны: моногр. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2016. 284 с.
7. Павлов И.Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях. М.: Химия, 1982. 220 с.
8. Эмануэль Н.М., Бучаченко А.Л. Химическая физика старения и стабилизации полимеров. М.: Наука, 1982. 360 с.
9. Кириллов В.Н., Старцев О.В., Ефимов В.А. Климатическая стойкость и повреждаемость полимерных композиционных материалов, проблемы и пути решения // Авиационные материалы и технологии: юбилейн. науч.-техн. сб. (прил. к журн. «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ, 2012. С. 412–423.
10. Грасси Н., Скотт Дж. Деструкция и стабилизация полимеров: пер. с англ. М.: Мир, 1988. 446 с.
11. Низина Т.А., Селяев В.П., Низин Д.Р., Артамонов Д.А. Климатическая стойкость композиционных строительных материалов в натурных условиях эксплуатации // Фундаментальные и прикладные исследования коррозии и старения материалов в климатических условиях: проблемы и перспективы: сб. докл. II Всерос. науч.-техн. конф. ВИАМ. М., 2015. С. 1.
12. Низина Т.А., Селяев В.П., Низин Д.Р., Артамонов Д.А. Климатическая стойкость полимерных композиционных материалов на основе эпоксидных связующих // Региональная архитектура и строительство. 2015. № 1. С. 34–42.
13. Низин Д.Р., Артамонов Д.А., Чернов А.Н., Низина Т.А. Результаты натурных испытаний полимерных композиционных материалов на основе эпоксидных связующих // Огарёв-online. Раздел «Технические науки». 2014. Спецвыпуск. URL:
<http://journal.mrsu.ru/arts/rezultaty-naturnykh-ispytanijj-olimernykh-kompozicionnykh-materialov-na-osnove-ehpoksidnykh-svyazuyushchikh>
14. Каблов Е.Н., Старцев О.В., Кротов А.С., Кириллов В.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения // Деформация, разрушение материалов. 2011. № 1. С. 34–40.

15. Хозин В.Г., Воскресенский В.А. Старение отверженных эпоксидных смол // Пласт. массы. 1969. № 6. С. 53–55.
16. Низина Т.А., Селяев В.П. Материальная база вуза как инновационный ресурс развития национального исследовательского университета // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всерос. науч.-техн. конф. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2014. С. 115–121.
17. Старцев О.В., Бапиров Ю.М., Кирюшкин С.Г., Торсueva Е.С. Физико-химические процессы в полиэтилене при старении в естественных и искусственных условиях // Докл. АН СССР. 1985. Т. 280, № 4. С. 946–950.

Низина Татьяна Анатольевна, д-р техн. наук, доц.; E-mail: nizinata@yandex.ru
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Артамонов Денис Александрович, асп.; E-mail: denartam@gmail.com
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Низин Дмитрий Рудольфович, асп.; E-mail: nizindi@yandex.ru
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Чернов Алексей Николаевич, асп.; E-mail: lhms13@yandex.ru
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Андронычев Даниил Олегович, асп., andronuchevd@mail.ru
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск

Получено 26.12.16

Nizina Tatyana Anatol'evna, DSc, Ass. Professor

Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Artamonov Denis Alexandrovich, Post-graduate Student

Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Nizin Dmitriy Rudolfovich, Post-graduate Student

Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Chernov Aleksey Nikolaevich, Post-graduate Student

Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

Andronychev Daniel Olegovich, Post-graduate Student

Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

ANALYSIS OF HARDENER INFLUENCE ON CLIMATIC RESISTANCE OF EPOXY COMPOSITE MATERIALS

Showed the experiment results of polymer composites based on epoxy binders exposed under impact of natural climatic factors of temperate climate. Completed the analysis of summary solar radiation and ultraviolet radiation ranges A and B change depending on season of climate impact. Defined the effect of exposure duration and intensity of actinometrical parameters on the elastic-strength properties of polymer composites change. Defined the coefficients of the exponential equation describing the change of relative strength and extension of epoxy composites under tension.

К e y w o r d s: polymer composites, epoxy binders, hardeners, exposure duration, actinometrical parameters, tensile strength, relative extension.

REFERENCES

1. Chernin I.Z., Smekhov F.M., Zherdev Yu.V. Epoksidnye polimery i kompozitsii [Epoxy polymers and compositions]. Moscow, Khimiya, 1982. 232 p. (in Russian)
2. Solomatov V.I., Selyaev V.P. Khimicheskoe soprotivlenie kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov [Chemical resistance of composite building materials]. Moscow, Stroyizdat, 1987. 264 p. (in Russian)
3. Solomatov V.I., Selyaev V.P., Sokolova Yu.A. Khimicheskoe soprotivlenie materialov [Chemical resistance of materials]. Moscow, RAASN, 2001. 284 p. (in Russian)
4. Khozin V.G. Usilenie epoksidnykh polimerov [Strengthening of epoxy polymers]. Kazan', 2004. 446 p. (in Russian)
5. Nizina T.A. Zashchitno-dekorativnye pokrytiya na osnove epoksidnykh i akrilovykh svyazuyushchikh [Protective and decorative coatings based on epoxy and acrylic binders]. Saransk, 2007. 258 p. (in Russian)
6. Selyaev V.P., Ivashchenko Yu.G., Nizina T.A. Polimerbetony: monografiya [Polymer concrete: monograph]. Saransk, 2016. 284 p. (in Russian)
7. Pavlov I.N. Starenie plastmass v estestvennykh i iskusstvennykh usloviyakh [Plastics aging in natural and artificial conditions]. Moscow, 1982. 220 p. (in Russian)
8. Emanuel' N.M., Buchachenko A.L. Khimicheskaya fizika stareniya i stabilizatsii polimerov [Chemical physics of aging and stabilization of polymers]. Moscow, Nauka, 1982. 360 p. (in Russian)
9. Kirillov V.N., Startsev O.V., Efimov V.A. Klimaticheskaya stoykost' i povrezhdaemost' polimernykh kompozitsionnykh materialov, problemy i puti resheniya [Weather resistance and defectiveness of polymer composite materials, problems and solutions]. Aviatsionnye materialy i tekhnologii [Aviation materials and technologies]. Moscow, VIAM, 2012. Pp. 412–423. (in Russian)
10. Grassi N., Scott G. Destruktsiya i stabilizatsiya polimerov [Degradation and stabilization of polymers]. Moscow, 1988. 446 p. (in Russian)
11. Nizina T.A., Selyaev V.P., Nizin D.R., Artamonov D.A. Klimaticheskaya stoykost' kompozitsionnykh stroitel'nykh materialov v naturnykh usloviyakh ekspluatatsii [Climatic resistant of composite building materials under conditions of natural climatic factors]. Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya korrozii i stareniya materialov v klimaticheskikh usloviyakh: problemy i perspektivy: sbornik dokladov II Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii [Basic and applied researches of corrosion and aging of materials in climatic conditions: problems and perspectives]. Moscow, VIAM. 2015. P. 1. (in Russian)
12. Nizina T.A., Selyaev V.P., Nizin D.R., Artamonov D.A. Klimaticheskaya stoykost' polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove epoksidnykh svyazuyushchikh [Climatic resistant of polymeric composite materials based on epoxy resins]. Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo [Regional architecture and construction]. 2015. No. 1. Pp. 34–42. (in Russian)
13. Nizin D.R., Artamonov D.A., Chernov A.N., Nizina T.A. Rezul'taty naturnykh ispytanii polimernykh kompozitsionnykh materialov na osnove epoksidnykh svyazuyushchikh [The results of field tests of polymer composite materials based on epoxy resins] // Ogarov-online. Razdel «Tekhnicheskie nauki». 2014. Spetsvypusk. Available at:
<http://journal.mrsu.ru/arts/rezultaty-naturnykh-ispytanij-polimernykh-kompozicionnykh-materialov-na-osnove-ehpoksidnykh-svyazuyushhikh>
14. Kablov E.N., Startsev O.V., Krotov A.S., Kirillov V.N. Klimaticheskoe starenie kompozitsionnykh materialov aviationsonnogo naznacheniya. III. Znachimye

- faktory stareniya [Climatic aging of aviation applications composites. III. Significant factors of aging]. Deformatsiya i razrusheniye materialov [Deformation, destruction of materials]. 2011. No. 1. Pp. 34–40. (in Russian)
15. Khozin V.G., Voskresenskiy V.A. Starenie otverzhdennykh epoksidnykh smol [Aging of cured epoxy resins]. Plastichekie massy [Plastics]. 1969. No. 6. Pp. 53–55. (in Russian)
16. Nizina T.A., Selyaev V.P. Material'naya baza vuza kak innovatsionnyy resurs razvitiya natsional'nogo issledovatel'skogo universiteta [The material base of the university as an innovative resource for the development of national research university]. Dolgovechnost' stroitel'nykh materialov, izdeliy i konstruktsiy: materialy Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii [Durability of construction materials, products and designs]. Saransk: Izd-vo Mordov. un-ta, 2014. Pp. 115–121. (in Russian)
17. Startsev O.V., Vapirov Yu.M., Kiryushkin S.G., Torsueva E.S. Fiziko-khimicheskie protsessy v polietilene pri starenii v estestvennykh i iskusstvennykh usloviyakh [Physico-chemical processes in polyethylene during aging in natural and artificial conditions] // Dokl. AN SSSR [Reports of the USSR Academy of Sciences]. 1985. Vol. 280, No. 4. Pp. 946–950. (in Russian)
-

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА



УДК 697.98.001.24

М.И. ШИЛЯЕВ, Е.М. ХРОМОВА, А.А. ДОРОШКИНА

РАСЧЕТ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ ИНЕРЦИОННО-КОНДЕНСАЦИОННО-АБСОРБЦИОННОЙ ПЫЛЕ-И ГАЗООЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ

Часть 1. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ИНЕРЦИОННЫХ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ И КАСКАДОВ ИЗ НИХ

Представлен универсальный метод расчета (УМР) инерционных пылеуловителей (ИП) как в одиночной, так и в каскадной компоновке. Для одиночных аппаратов отечественных и зарубежных приведены банк данных по основным характеристикам, отвечающим за фракционную эффективность и за их коэффициенты гидравлического сопротивления, и универсальная номограмма, позволяющая рассчитать 52 аппарата различных типов. Приведен пример выбора типа и расчета циклонов НИИОГАЗ на основе УМР и энергетического принципа (ЭП) сравнения ИП и каскадов из них по удельным энергозатратам на пылеулавливание для I, сухой, ступени очистки дымовых газов от золоуноса трехступенчатой комплексной инерционно-конденсационно-абсорбционной пыле- и газоочистки. Проведено важное уточнение ЭП для каскадов ИП для весовой функции распределения частиц по размерам общего вида.

Ключевые слова: инерционные пылеуловители, форсуночные скрубберы, пенные и центробежно-барботажные аппараты, многоступенчатая пыле- и газоочистка, оросительные камеры СКВ.

Введение. Использование с необходимостью большей доли угля в теплоэнергетическом балансе ведущих стран мира в связи с исчерпаемостью нефти и газа в ближайшей перспективе существенно может осложнить экологическое состояние окружающей среды. Так, в результате замены газа углем выбросы в атмосферу на европейской части России в сравнении с 1998 г. могут возрасти: по летучей золе на 16–43 %, по NO_x на 20–24 %, по SO_2 на 28–34 %. Особенно остро эта проблема обозначилась уже сейчас для Китайской Народной Республики с ее бурно развивающейся промышленностью, где основным топливом является энергетический уголь. Эти обстоятельства требуют совершенствования пыле- и газоочистного оборудования и методов его расчета в направлении как повышения эффективности газоочистки, так

и снижения удельных материальных и энергетических затрат на ее осуществление.

Авторами настоящей работы предлагается система расчета комплексной трехступенчатой инерционной и абсорбционно-конденсационной пыле- и газоочистки промышленных газов с помощью аппаратов различных типов. Система расчета, реализуемая на ЭВМ, позволяет оптимизировать выбор типов аппаратов, их компоновку, габариты и режимные параметры их работы по минимуму металло- и энергозатрат при обеспечении требуемых норм концентраций вредностей в выбросах в атмосферу.

В основу системы расчета I ступени положены универсальный метод расчета инерционных пылеуловителей (УМР), разработанный авторами [1, 2], для которых составлен банк данных (БД) по основным характеристикам, отвечающим за качество пылеулавливания и гидравлическое сопротивление аппаратов, а также энергетический принцип (ЭП) сравнения пылеуловителей и систем из них (каскадных, батарейных) по удельным энергозатратам на очистку газов. УМР и ЭП с использованием БД позволяют расчетным путем подобрать менее энергоемкое пылеулавливающее оборудование для I ступени инерционной очистки газов от пыли. При этом I ступень в свою очередь может представлять собой каскад из последовательно устанавливаемых инерционного типа пылеуловителей. II ступень рассчитывается на основе обобщенной абсорбционно-конденсационной модели, также разработанной авторами [3–7] для форсуночных аппаратов, в которых осуществляется контактный тепломассообмен между каплями жидкости и парогазовым потоком и конденсационное доулавливание тонкодисперсной пыли, вынесенной из I ступени, и абсорбируются вредные газовые компоненты на каплях жидкости и конденсате на частицах до санитарных норм. Аппаратами для промышленной очистки газов могут служить скруббера Вентури или полые форсуночные скруббера. В этой ступени абсорбируется основная часть тонкодисперсной пыли и вредных газовых компонентов.

Для окончательной очистки газов от вредных газовых компонентов и субмикронной пыли могут быть использованы в качестве III ступени пенные или центробежно-барботажные аппараты, для которых также разработаны авторами математические модели абсорбционно-конденсационной пыле- и газоочистки [1, 2, 6, 8]. Представлены примеры расчетов, иллюстрирующие возможности предлагаемой системы как для комплексной очистки дымовых газов котельных и ТЭС, так и вентиляционных выбросов в атмосферу, а также для тепловлажностной обработки и очистки воздуха в оросительных камерах систем кондиционирования воздуха и систем вентиляции [9].

Материалы изложены в трех статьях. Первая посвящена УМР, вторая – моделированию инерционно-абсорбционной пылегазоочистки, третья – системе сквозного расчета комплексной пылегазоочистки промышленных и вентиляционных выбросов в атмосферу.

Универсальная номограмма. В [1, 2] изложен универсальный метод расчета инерционных пылеуловителей, базирующийся на представлении фракционного коэффициента проскока K_δ в виде обобщенной экспоненциальной зависимости от безразмерного числа Стокса:

$$K_\delta = \frac{C_{\delta\text{вых}}}{C_{\delta\text{вх}}} = e^{-aStk^n}, \quad (1)$$

где $c_{\delta_{\text{вх}}}$ и $c_{\delta_{\text{вых}}}$ – входная и выходная концентрации частиц пыли размером (диаметром) δ в аппарате; a и n – постоянные, определяющие пылеулавливающие качества аппарата (занесены в БД) (таблица); Stk – число Стокса:

$$\text{Stk} = \frac{\rho_m \delta^2 V}{18 \mu d}, \quad (2)$$

где ρ_m – плотность частиц пыли; μ – динамическая вязкость очищаемого газа; V и d – характерные скорость и линейный размер инерционного улавливания пыли аппаратом (представлены в БД, см. таблицу).

Как правило, в батарею устанавливаются параллельно однотипные аппараты для очистки общего расхода газа L_{Σ} . Пусть на I ступени сухой очистки газов от пыли их будет K_1 . Так что расход через каждый отдельный аппарат будет равен $L_1 = L_{\Sigma} / K_1$. Если линейные размеры d есть диаметры расходных сечений аппаратов, то на I ступени

$$V_1 = \frac{4L_1}{\pi d_1^2}. \quad (3)$$

Здесь d_1 – диаметр расходного сечения аппарата, например, для циклона – это его диаметр, выбирается по рекомендуемой расчетной скорости V_1 [1, 2] и количеству циклонов K_1 .

Полная эффективность пылеулавливания на I ступени сухой очистки выражается интегралом

$$\eta_1 = 1 - \int_0^{\infty} K_{\delta_1} g_1(\delta) d\delta = 1 - K_{\Sigma 1}, \quad (4)$$

где $K_{\Sigma 1}$ и $K_{\delta 1}$ – суммарный (полный) и фракционный коэффициенты проскара I ступени сухой очистки:

$$K_{\delta 1} = e^{-a_1 \text{Stk}_1^{n_1}}, \quad \text{Stk}_1 = \frac{\rho_m \delta^2 V_1}{18 \mu_1 d_1}, \quad (5)$$

$a_1, n_1, V_1, d_1, \mu_1$ – отвечают I ступени.

Динамическая вязкость газа μ_1 вычисляется по формуле Сатерленда в зависимости от температуры входящих в аппарат газов T_{rl}

$$\mu_1 = \mu_0 \frac{T_0 + C}{T_{rl} + C} \left(\frac{T_{rl}}{T_0} \right)^{3/2}. \quad (6)$$

Для дымовых газов можно принять, как и для воздуха, $\mu_0 = 17,3 \cdot 10^{-6}$ Па · с при $T_0 = 273$ К, $C = 124$.

Большинство промышленных пылей подчиняется логарифмически нормальному закону распределения частиц по размерам (ЛНР), так что можно принять

$$g_1(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \ln \sigma_1} \frac{1}{\delta} e^{-\frac{\ln^2(\delta/\delta_{50,1})}{2\ln^2 \sigma_1}}, \quad (7)$$

где $g_1(\delta)$ – весовая дифференциальная функция распределения частиц пыли по размерам на входе в газоочистную систему, $\delta_{50,1}$ и σ_1 – масс-меди-

анный размер и стандартное геометрическое отклонение для распределения $g_1(\delta)$.

Учитывая (5), (7) и переходя к новой переменной

$$t = \frac{\ln(\delta/\delta_{50,1})}{\ln\sigma_1}, \quad (8)$$

выражение (4) можно записать в виде

$$\eta_1 = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left(-\alpha_1 \sigma_1^{2n_1 t} - \frac{t^2}{2}\right) dt = 1 - f(\alpha_1, \sigma_1^{n_1}), \quad (9)$$

где

$$\alpha_1 = a_1 \text{Stk}_{50,1}, \quad \text{Stk}_{50,1} = \tau_{50,1} \frac{V_1}{d_1}, \quad \tau_{50,1} = \frac{\rho_m \delta_{50,1}^2}{18\mu_1}. \quad (10)$$

Здесь индекс 1 соответствует параметрам аппаратов и входным параметрам пыли и газа I ступени.

В [1, 2] интеграл (9) представлен в виде универсальной номограммы (рис. 1) $K_{\Sigma 1} = f(\alpha_1, \sigma^{n_1})$ для графического определения эффективности пылеулавливания по заданным параметрам аппаратов, пыли и газа, либо для определения параметров аппаратов по заданным параметрам пыли и газа и требуемой эффективности $\eta_1 = 1 - K_{\Sigma 1}$.

При расчете последовательно устанавливаемых аппаратов в каскады для II и последующих ступеней следует вводить эмпирическую поправку на снижение фракционной эффективности в этих ступенях за счет влияния турбулентности потока газа на наиболее мелкие частицы в зависимости от их размеров. Анализ этого влияния и количественный его учет проведен в [10].

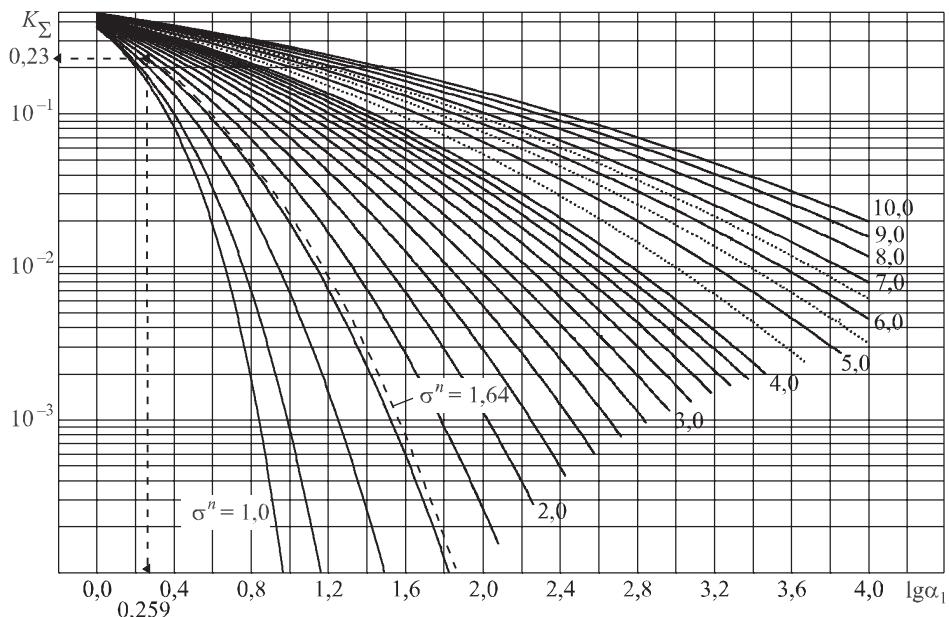


Рис. 1. Универсальная номограмма для расчета инерционных пылеуловителей

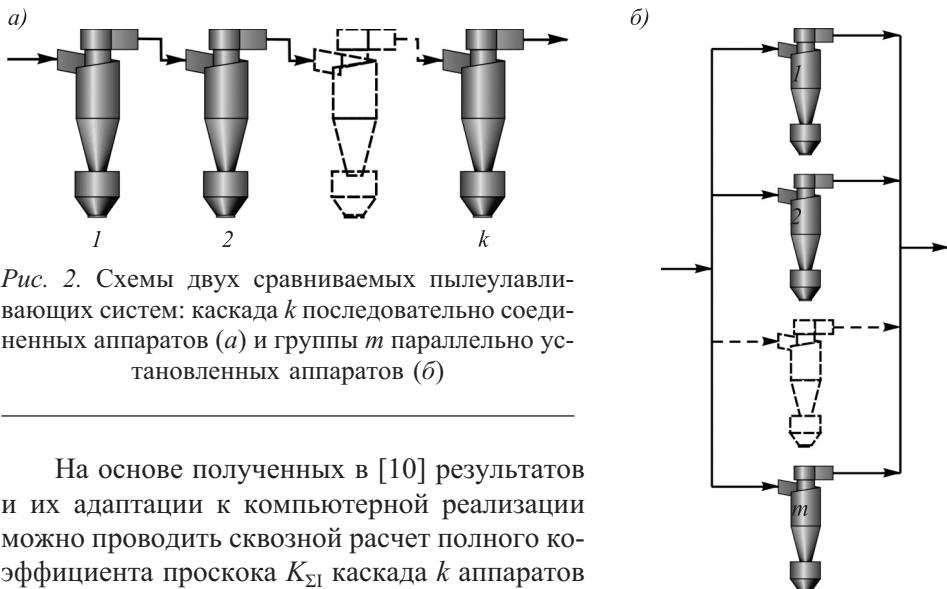


Рис. 2. Схемы двух сравниваемых пылеулавливающих систем: каскада k последовательно соединенных аппаратов (а) и группы m параллельно установленных аппаратов (б)

На основе полученных в [10] результатов и их адаптации к компьютерной реализации можно проводить сквозной расчет полного коэффициента проскока $K_{\Sigma I}$ каскада k аппаратов (рис. 2, а) по формуле

$$K_{\Sigma I} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} \prod_{i=1}^k [1 - c_i(\delta) + c_i(\delta) \exp(-a_i \text{Stk}_{50,i}^{n_i} \sigma^{2n_i t})] dt, \quad (11)$$

где $i = 1, 2, \dots, k$; $t = \frac{\ln(\delta/\delta_{50})}{\ln \sigma}$; $\text{Stk}_{50,i} = \frac{\rho_m \delta_{50}^2 V_i}{18 \mu_i d_i}$; δ_{50} и σ – масс-медианный

размер и стандартное логарифмическое отклонение ЛНР исходной пыли в газе, поступающем на очистку; c_i – поправочные коэффициенты на снижение эффективности пылеулавливания от ступени к ступени за счет воздействия турбулентных пульсаций на наиболее мелкие частицы:

$$\begin{cases} c_1(\delta) = 1; \\ c_2(\delta) = 0,2535 \ln \delta + 0,06767 & \text{при } 1 \text{ мкм} < \delta < 36 \text{ мкм}, \\ c_2(\delta) = 0,0677 \delta & \text{при } \delta \leq 1 \text{ мкм}, \\ c_2(\delta) = 1 & \text{при } \delta \geq 36 \text{ мкм}; \\ c_3(\delta) = 0,3633 \ln \delta - 0,3072 & \text{при } 3 \text{ мкм} < \delta < 36 \text{ мкм}, \\ c_3(\delta) = 0,03064 \delta & \text{при } \delta < 3 \text{ мкм}, \\ c_3(\delta) = 1 & \text{при } \delta \geq 36 \text{ мкм}. \\ c_4(\delta) = c_3(\delta) \end{cases} \quad (12)$$

Общая эффективность пылеулавливания I ступени будет равна

$$\eta_{\Sigma I} = 1 - K_{\Sigma I}. \quad (13)$$

Энергетический принцип сравнения пылеулавливающих аппаратов.

В [1, 2] приведено математическое выражение ЭП в общем случае для сравниваемых при равной эффективности каскадных систем пылеулавливания с последовательной установкой аппаратов и батарейных систем с параллельной установкой аппаратов. При этом полагается, что каскады компо-

нужются из аппаратов одного типа с индексом 1 (см. рис. 2, *a*), батареи – из аппаратов другого типа с индексом 0 (рис. 2, *б*).

Это выражение имеет вид:

$$\frac{\Delta p_{\Sigma_{k,1}}^{\frac{n_1+n_0}{2}}}{\Delta p_0^{\frac{n_0+n_0}{2}}} = \Omega^2 \frac{m^{n_0}}{k^{\frac{2-n_0-n_1}{2}}} \left(\frac{a_0}{a_1} \right)^2 \frac{\zeta_1^{\frac{n_1+n_0}{2}}}{\zeta_0^{\frac{n_0+n_0}{2}}} \left[\left(\frac{\tau_{50}}{d_1} \right)^2 \frac{2}{\rho} \right]^{\frac{(n_0-n_1)}{2}}, \quad (14)$$

$$\Omega = [(\delta_{0, \text{cp}} / \delta_{50})^{n_0} (\delta_{1, \text{cp}, k} / \delta_{50})^{-n_1}]^2, \quad (15)$$

где $\delta_{1, \text{cp}, k}$ и $\delta_{0, \text{cp}}$ – средние размеры частиц, вычисляемые по формулам:

$$\delta_{1, \text{cp}, k} = \left(\frac{-\ln K_\Sigma}{k A_1} \right)^{\frac{1}{2n_1}}; \quad \delta_{0, \text{cp}} = \left(\frac{-\ln K_\Sigma}{A_0} \right)^{\frac{1}{2n_0}}, \quad (16)$$

$$A_1 = a_1 \left(\frac{\rho_m V_1}{18 \mu d_1} \right)^{n_1}; \quad A_0 = a_0 \left(\frac{\rho_m V_0}{18 \mu d_0} \right)^{n_0}. \quad (17)$$

Здесь ζ_0 и ζ_1 – коэффициенты гидравлического сопротивления аппаратов батареи и каскада соответственно; K_Σ – общий проскок ($K_\Sigma = 1 - \eta_\Sigma$), при котором сравниваются системы; ρ – плотность газа; $\Delta P_{\Sigma_{k,1}}$ и ΔP_0 – перепады давления на каскаде и на батарее. Зависимость (14) предполагает общий вид весовой дифференциальной функции распределения частиц по размерам $g(\delta)$. Если $g(\delta)$ подчиняется ЛНР (7), то [2]

$$\Omega = \sigma^{2(n_0 t_{0, \text{cp}} - n_1 t_{1, \text{cp}})}, \quad (18)$$

где

$$t_{i, \text{cp}} = \frac{1}{2n_i} \ln \left(\frac{-\ln K_\Sigma}{\alpha_i} \right) / \ln \sigma, \quad i = 0, 1, \quad (19)$$

$$\alpha_0 = a_0 \text{Stk}_{0,50}^{n_0}, \quad (20)$$

$$\alpha_1 = k a_1 \text{Stk}_{1,50}^{n_1}, \quad (21)$$

$$\text{Stk}_{0,50} = \tau_{50} \frac{V_0}{d_0}, \quad \text{Stk}_{1,50} = \tau_{50} \frac{V_1}{d_1}, \quad (22)$$

$$\tau_{50} = \frac{\rho_m \delta_{50}^2}{18 \mu}. \quad (23)$$

При использовании выражения (14) в практических целях коэффициенты $a_0, a_1; n_0, n_1; \zeta_0, \zeta_1$ подставляются из таблицы. Примеры сравнения каскадов и единичных аппаратов между собой по формуле (14) приведены в [1, 2]. Показано, что каскады менее энергоемки, чем одиночные аппараты.

Пример расчета. Требуется произвести расчет системы очистки дымовых газов котельной, работающей на кузнецком тощем угле, от золоуноса

Банк данных по характеристикам инерционных пылеуловителей

№ п/п	Пылеуловитель	<i>a</i>	<i>n</i>	<i>V</i>	<i>d</i>	ζ
1	2	3	4	5	6	7
1	Циклоны НИИОГАЗ:					
1	ЦН-11	22,05	0,45			250
2	ЦН-15	18,14	0,46			163
3	ЦН-15у	12,37	0,41			170
4	ЦН-24	11,90	0,47			80
5	СДК-ЦН-33	24,31	0,37			600
6	СК-ЦН-34	27,90	0,38			1150
7	СЦН-40	25,05	0,35			1200
8	Циклоны ЛИОТ: цилиндрический	12,0	0,29			285
9	конический	80,0	0,53			495
10	Циклон ВЦНИИОТ	33,0	0,73	»	»	84
11	Циклон СИОТ	17,6	0,33	»	»	1249
12	Циклон Давидсона	4,6	0,3	»	»	97
13	Циклон Ван-Тонгерена	11,4	0,3	»	»	260
14	Циклон «Кестнер»	6,0	0,24	»	»	850
15	Циклоны Стейрманда: модель А	7,0	0,21			163
16	модель Б	9,5	0,48			123
17	Батарейные циклоны: «Розетка – 25°»	12,0	0,46			90
18	«Розетка – 30°»	9,0	0,42			65
19	«Винт – 25°»	10,5	0,43	»	»	85
20	«Энергоуголь»	50,0	0,6			100
21	Прямоточный элемент	4,7	0,35			8,5
22	Прямоточный циклон (ПЦ)	$26,22 \left(\frac{9 \cdot \rho}{\rho_m} Re \right)^{-1/8}$	0,625	»	»	8,5
23	Магистральный ПЦ: 6 лопаток под углом 45°	3,3	0,75			7
24	8 лопаток под углом 45°	4,8	0,75	»	»	11
25	8 лопаток под углом 60°	8,0	0,75			14
26	Каскад двух магистральных ПЦ 6 лопаток под углом 45°	7,25	0,75			12
27	8 лопаток под углом 45°	6,7	0,75	»	»	16
28	8 лопаток под углом 60°	17,85	0,75			26
29	Каскад трех магистральных ПЦ 6 лопаток под углом 45°	9,0	0,75			18
30	8 лопаток под углом 45°	7,3	0,75	»	»	25
31	8 лопаток под углом 60°	22,0	0,75			50
32	Прямоточный циклон ЦКТИ	15,7	0,6	»	»	47
33	Камера Говарда	п. 3.13.5 [2]	п. 3.13	Скорость в щели	Высота щели	п. 3.13.5 [2]
34	ЖЗУ ВТИ	3,54	0,5	Скорость в газоходе	Ширина газохода	5
35	Сpirальный пылеуловитель	24,0	0,7	Скорость через боко- вую по- верхность цилиндра начальной окруж- ности	Диаметр началь- ной окруж- ности улики	63

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7
36	Дымосос-пылеуловитель	30,0	0,45	То же	То же	53
37	Сухой электрофильтр	п. 3.16 [2]	0,5	Скорость газов в активном сечении	Расстояние между электродами	п. 3.16 [2]
38	Пенный аппарат	3,0	0,5	Скорость в отверстиях решетки	Диаметр отверстий решетки	п. 4.1.1 [2]
39	Центробежно-барботажный аппарат	3,85	0,5	Скорость в щелях завихрителя	Гидравл. диаметр щелей завихрителя	п. 4.1.2 [2]
40	Скрубер Вентури	п. 4.2	0,5	Скорость в горловине трубы Вентури	Диаметр капель	п. 4.2 [2]
41	ЦС ВТИ	5,2	0,2	Скорость в плане	Диаметр циклона	$30 + 7,4d^{-1,5}$
42	МП ВТИ	п. 4.3.2 [9]	п. 4.3.2 [1]	То же	То же	75
43	ЦВП ЛИОТ	12,2	0,5	»	»	35
44 45	ЦВП ППВ: Основная модель Скоростная модель	5,2 7,2	0,2 0,18	»	»	30 74
46	Газопромыватель СИОТ	14,5	0,25	»	»	300
47	СЦВБ-20	12,5	0,42	»	»	6,875
48	Пылеулавливающие элементы со шнеком	п. 4.8 [1]	п. 4.8 [1]	Расходная скорость	Диаметр элемента	п. 4.8 [1]
49	МП ВЦЖ	1,4	0,5	Скорость газа в щели контактного канала	Диаметр капель	п. 4.9 [1]
50	ПФС	34,3	0,89	Относительная скорость газа и стационарного осаждения капли [2]	То же	п. 5.1 [2]
51	Циклон УЦ-38	41,5	0,42	Скорость в плане	Диаметр циклона	2539
52	Пат. 2316397 РФ (КузГТУ)	3,656	0,135	То же	То же	185 [11]

Примечание. По позиции 22 $Re = \frac{Vd\rho}{\mu}$, ρ – плотность газа.

и SO_2 до допустимых концентраций в выбросах в атмосферу. Фракционный состав пыли золоуноса соответствует параметрам ЛИР: $\delta_{50} = 18 \text{ мкм}$, $\sigma = 3,0$. Плотность частиц пыли $\rho_m = 2400 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Расход дымовых газов $100 \text{ м}^3/\text{с} = 360\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$ и его температура $t_{rl} = 130^\circ\text{C} = 403 \text{ К}$, начальная концентрация золы в дымовых газах $c_{bx} = 14 \text{ г}/\text{м}^3$, начальная концентрация $\text{SO}_2 d_{\text{SO}_2,0} = 0,1 \text{ кг}/\text{кг сух. газов}$, начальное влагосодержание газов $d_0 = 0,1 \text{ кг}/\text{кг сух. газов}$. Эффективность пылеулавливания системы, обеспечивающей при высоте трубы котельной $H = 80 \text{ м}$ допустимую концентрацию пыли в зоне дыхания в приземном слое атмосферы $c_{\text{ПДК}} = 0,25 \text{ мг}/\text{м}^3$, должна быть не ниже 92,54 % [1, 2].

Оценим, прежде всего, какими пылеуловителями можно обеспечить требуемую степень пылеулавливания на I ступени.

1. Примем к расчету высокопроизводительный циклон НИИОГАЗ ЦН-24. Оценим, на основе метода НИИОГАЗ, какой диаметр циклона обеспечит требуемую эффективность 92,54 % от пыли при заданных параметрах: μ_1 ($t_{rl} = 130^\circ\text{C}$) = $24,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ (определяется по формуле (6)); $V_{\text{pac}} = 4,5 \text{ м}/\text{с}$ (рекомендуемое значение скорости газа в плане циклона ЦН-24 [1, 2]). Формулу пересчета диаметра циклона с реального размера частиц пыли $\delta_{50,1}$ на условный $\delta'_{50,1}$ можно привести к виду [2]

$$d' = \frac{\left(\frac{\delta_{50,1}}{\delta'_{50,1}}\right)^2 V_{\text{pac}} \rho_m}{K^2 \cdot 10^6 \mu_1}, \quad (24)$$

где для ЦН-24 $K = 46,9$, а по номограмме для этого циклона при $\eta_1 = 92,54 \%$ и $\sigma = 3,0$ $\delta'_{50,1} = 39 \text{ мкм}$.

Подставляя вышеприведенные величины в формулу (24), получим $d' = 4,5 \text{ см}$, что не является реальным диаметром циклона. То же самое значение d' можно получить с помощью универсальной номограммы рис. 1.

2. Проведем расчет на более эффективный циклон ЦН-11. Зададим диаметр этого циклона $d = 1,6 \text{ м}$, тогда при расчетной скорости в плане для циклона ЦН-11 $3,5 \text{ м}/\text{с}$ надо параллельно установить в одном ряду 14 таких циклонов. На основе расчета по формуле (11) с учетом снижения эффективности от ступени к ступени последовательная установка трех рядов таких аппаратов может обеспечить приемлемую эффективность 92 %, однако для этого потребуется 42 циклона. Это будет слишком громоздкая, металло- и энергоемкая конструкция только одной сухой I ступени.

3. Задачу можно решить иначе – комплексно и более эффективно.

Пусть на I ступени будут установлены параллельно 14 циклонов ЦН-11 диаметром $d = 1,6 \text{ м}$. Эффективность улавливания пыли ими обеспечится на 76,8 % (расчет может быть произведен по номограмме рис. 1 или по формуле (11) на компьютере при $i = 1$).

При этом рассмотрим целесообразность организации многоступенчатой сухой пылеочистки в этом случае (см. рис. 2, a). Проанализируем повышение эффективности пылеулавливания, снижение концентрации пыли, изменение фракционного состава от ступени к ступени сухой I ступени. Расчеты проведем по формуле (11) для каскада $k = 4$ циклонов НИИОГАЗ диаметром

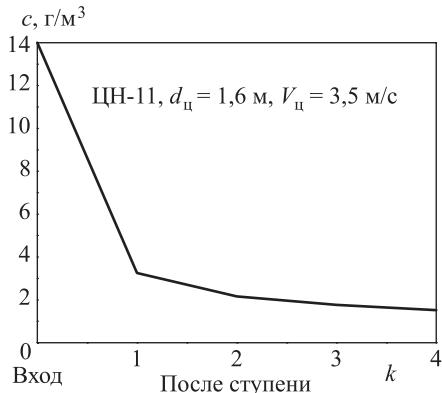


Рис. 3. Снижение концентрации пыли в газе после i -й ступени

слабо. Отсюда следует, что в данном конкретном случае нецелесообразно из экономических соображений устанавливать более одного ряда циклонов ЦН-11, поскольку на последующих ступенях концентрация пыли снижается незначительно, а металлоемкость и габариты пылеулавливающей системы, а также гидравлические потери и, следовательно, энергозатраты на газоочистку растут кратно с количеством ступеней. В этом случае доулавливание тонкодисперсной пыли до санитарных норм может быть осуществлено конденсационно, например, в скрубберах Вентури, что будет рассмотрено в следующей статье.

На рис. 4 представлены интегральные функции проходов $D_i(\delta) = \int_0^\delta g_i(\delta)d\delta$

на входе в пылеулавливающую систему (индекс 1) и на выходе из каждой ступени каскада (индексы 2...5). Формулы перерасчета функций $D_i(\delta)$ приведены в [12]. Из рис. 4 видно, что частиц размером от 0 до 1,6 мкм в исходной пыли всего 1,5 %. Следовательно, в данном случае дальнейший расчет конденсационного улавливания пыли на размер частиц $\delta_{40} = 0,1$ мкм или даже $\delta_{40} = 1$ мкм вполне достаточен для определения длины диффузора скруббера Вентури II ступени конденсационно-абсорбционной пыле- и газо-

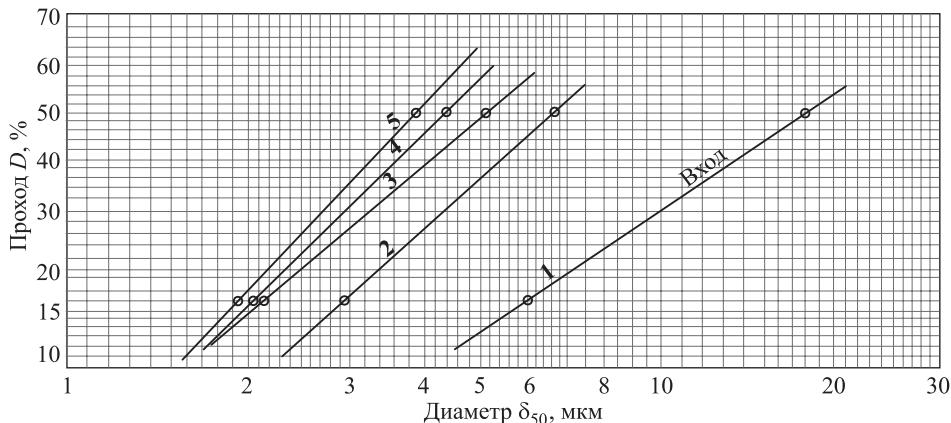


Рис. 4. Функции проходов $D_i(\delta)$ на входе по ступеням каскада

$d = 1,6 \text{ м}$, скорости газов в плане $V = 3,5 \text{ м/с}$ и вышеприведенных параметрах пыли и газа. На рис. 3 приведены результаты расчетов для каскадной схемы рис. 2, a.

Из рис. 3 видно, что большая часть пыли улавливается I ступенью, где и осуществляется основное снижение ее концентрации в очищаемом газе, в данном случае с 14 до 3,25 г/м³. Масс-медианный размер частиц снижается также в основном за счет улавливания наиболее крупных частиц в I ступени, в данном случае с 18 до 6,74 мкм, далее от ступени к ступени он меняется

очистки для обеспечения санитарных норм концентрации пыли в выбросах в атмосферу.

4. Проведем обоснование выбора типа циклонов НИИОГАЗ для первой, сухой, очистки газов от пыли. Сравним в данном случае по удельным энергозатратам на пылеулавливание циклоны ЦН-24 и ЦН-11 на основе ЭП. Для логарифмически нормального распределения частиц пыли по размерам (7) математическое выражение ЭП (14) в нашем случае сравнения двух циклонов будет иметь вид

$$\frac{\Delta P_1^{n_1}}{\Delta P_2^{n_2}} = \sigma^{4(n_2 t_{2,\text{cp}} - n_1 t_{1,\text{cp}})} \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^2 \left(\frac{(\xi_1 d_1^2)^{n_1}}{(\xi_2 d_2^2)^{n_2}} \left(\tau_{50}^2 \frac{2}{\rho} \right)^{(n_2 - n_1)} \right), \quad (25)$$

индекс 1 относится к параметрам циклона ЦН-11, 2 – циклона ЦН-24. Здесь из БД (см. таблицу): $a_1 = 22,05$, $n_1 = 0,45$, $\xi_1 = 250$; $a_2 = 11,90$, $n_2 = 0,47$, $\xi_2 = 80$. Примем для циклона ЦН-11 $d_1 = 1,6$ м, а для циклона ЦН-24 диаметр d_2 должен соответствовать равенству объемных расходов очищаемых газов в обоих циклонах

$$d_1^2 V_1 = d_2^2 V_2, \quad (26)$$

а также равенству эффективностей пылеочистки, т.е. должно быть

$$K_{\Sigma 1} = K_{\Sigma 2}. \quad (27)$$

Из этих же условий определяется и соотношение между скоростями V_1 и V_2 в циклонах.

Зададим $V_1 = 3,5$ м/с. Тогда из соотношений (26) и (27) установим d_2 и V_2 . $K_{\Sigma 2}$ найдем по универсальной номограмме (УН) рис. 1. Для этого вычислим параметры, необходимые для вхождения в УН:

$$\alpha_1 = a_1 \text{Stk}_{50,1}^{n_1} = a_1 \left(\frac{\rho_m \delta_{50}^2}{18 \mu} \frac{V_1}{d_1} \right)^{n_1} = 22,05 \left(\frac{2400(18)^2 \cdot 10^{-12}}{18 \cdot 24,3 \cdot 10^{-6}} \frac{3,5}{1,6} \right)^{0,45} = 1,815,$$

$$\lg \alpha_1 = 0,259; \quad \sigma^{n_1} = 3^{0,45} = 1,64.$$

По найденным значениям $\lg \alpha_1$ и σ^{n_1} из УН находим $K_{\Sigma} \approx 0,23$ или $\eta_{\Sigma 1} = 77\%$ (на номограмме показано пунктирными линиями). Более точное значение, полученное на компьютере по формуле (9), $\eta_{\Sigma 1} = 76,8\%$.

Для того, чтобы было $\eta_{\Sigma 2} = \eta_{\Sigma 1}$, необходимо выполнение равенства $\alpha_2 = \alpha_1$, т.е.

$$\alpha_2 = a_2 \left(\frac{\rho_m \delta_{50}^2}{18 \mu} \frac{V_2}{d_2} \right)^{n_2} = 11,9 \left(\frac{2400(18)^2 10^{-12}}{18 \cdot 24,3 \cdot 10^{-6}} \frac{V_2}{d_2} \right)^{0,47} = \alpha_1 = 1,815. \quad (28)$$

Из (26) и (28) получаем

$$d_2^2 V_2 = (1,6)^2 3,5,$$

откуда

$$d_2 = 0,955 \text{ м}, \quad V_2 = 9,82 \text{ м/с}. \quad (29)$$

Гидравлическое сопротивление аппаратов определяется выражениями:

$$\Delta P_1 = \xi_1 \rho \frac{V_1^2}{2}, \quad \Delta P_2 = \xi_2 \rho \frac{V_2^2}{2}, \quad (30)$$

где плотность очищаемых газов при температуре 130 °C (403 K) равна

$$\rho \approx \frac{353}{403} \approx 0,9 \text{ кг/м}^3. \quad (31)$$

Так что будем иметь

$$\Delta P_1 = 250 \cdot 0,9 \frac{(3,5)^2}{2} = 1378 \text{ Па}, \quad (32)$$

$$\Delta P_2 = 80 \cdot 0,9 \frac{(9,82)^2}{2} = 3472 \text{ Па}, \quad (33)$$

откуда $\Delta P_2 / \Delta P_1 = 2,52$, т.е. энергозатраты на пылеулавливание в ЦН-24 для данной пыли в 2,52 раза выше, чем в ЦН-11, что дает предпочтение установки циклонов ЦН-11 на I ступени в сравнении с ЦН-24.

Тот же результат получается непосредственно из формулы (25). Вычислим $t_{1,\text{cp}}$ и $t_{2,\text{cp}}$ при $\ln \sigma = \ln 3 = 1,1$:

$$t_{1,\text{cp}} = \frac{1}{2 \cdot 0,45} \frac{\ln\left(-\frac{\ln 0,23}{1,815}\right)}{1,1}; \quad t_{2,\text{cp}} = \frac{1}{2 \cdot 0,47} \frac{\ln\left(-\frac{\ln 0,23}{1,815}\right)}{1,1},$$

откуда $n_1 t_{1,\text{cp}} = n_2 t_{2,\text{cp}}$ и $\sigma^{4(n_2 t_{2,\text{cp}} - n_1 t_{1,\text{cp}})} = \sigma^0 = 1$.

Далее

$$\left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2 = \left(\frac{11,90}{22,05}\right)^2 = 0,291; \quad \frac{(\xi_1 d_1^2)^{n_1}}{(\xi_2 d_2^2)^{n_2}} = \frac{(250(1,6)^2)^{0,45}}{(80(0,955)^2)^{0,47}} = \frac{18,314}{7,51} = 2,44;$$

$$\left(\tau_{50}^2 \frac{2}{\rho}\right)^{(n_2 - n_1)} = \left[\left(\frac{2400(18)^2 10^{-12}}{18 \cdot 24,3 \cdot 10^{-6}}\right)^2 \frac{2}{0,9}\right]^{(0,47 - 0,45)} = 0,7887;$$

$$\frac{\Delta P_1^{n_1}}{\Delta P_2^{n_2}} = 0,291 \cdot 2,44 \cdot 0,7887 = 0,56 \quad \text{или} \quad \frac{\Delta P_1^{0,45}}{\Delta P_2^{0,47}} = 0,56.$$

При $\Delta P_2 = 3472$ Па $\Delta P_1 = (0,56 \Delta P_2^{0,47})^{1/0,45} = (0,56(3472)^{0,47})^{2,222} = 1375$ Па,

что соответствует результату (32).

Таким образом, может быть сделан выбор наиболее экономичного типа одиночных циклонов I, сухой, ступени. Если же требуется каскад аппаратов, необходимо для выбора пользоваться общей формулой (14).

Расчет окончательной очистки газов по параметрам предложенного примера от мелкодисперсной пыли и вредных газовых компонентов на последующих ступенях будет представлен в следующих статьях на основе обобщенных конденсационно-абсорбционных моделей для форсуночных и барботажных аппаратов.

При сравнении двух аппаратов, как следует из вышеизложенного, уравнение (25) следует писать в виде

$$\frac{\Delta P_1^{n_1}}{\Delta P_2^{n_2}} = \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^2 \frac{(\xi_1 d_1^2)^{n_1}}{(\xi_2 d_2^2)^{n_2}} \left(\tau_{50} \frac{2}{\rho} \right)^{(n_2 - n_1)}. \quad (34)$$

В общем случае сравнения систем (рис. 2, а, б), выражение (14) существенно упрощается за счет того, что $\Omega = 1$ при любом распределении частиц по размерам, поскольку вследствие требования равенства эффективностей сравниваемых систем должно быть $kA_1 = A_0$.

В (14) уже учтено равенство расходов очищаемого газа в сравниваемых системах.

Выводы. Представлен и проанализирован алгоритм и пример расчета каскадной системы пылеулавливания с помощью инерционных аппаратов I, сухой, ступени многоступенчатой комплексной газоочистки, в частности, циклонов НИИОГАЗ. Показана возможность оптимизации процессов газоочистки и оборудования пылеулавливающей системы с помощью УМР и ЭП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шиляев М.И., Шиляев А.М., Грищенко Е.П. Методы расчета пылеуловителей. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2006. 385 с.
2. Шиляев М.И. Методы расчета пылеулавливающих систем. М.: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2014. 320 с.
3. Шиляев М.И. Аэродинамика и тепломассообмен газодисперсных потоков. 2-е изд., испр. и доп. М.: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2015. 288 с.
4. Shilyaev M.I., Khromova E.M. Capture of fine dust in jet scrubbers. Mass transfer in multiphase systems and its applications. Vienna, Austria: In Tech, 2011. Р. 311–335.
5. Shilyaev M.I., Khromova E.M. Modeling of heat and mass transfer and absorption-condensation dust and gas cleaning in jet scrubbers. Mass transfer – advances in sustainable energy and environment oriented numerical modeling. Vienna, Austria: In Tech, 2013. Р. 163–194.
6. Шиляев М.И., Хромова Е.М., Толстых А.В. Контактный тепло- и массообмен в форсуночных и барботажных аппаратах. Моделирование, оптимизация тепломассообмена и абсорбционно-конденсационной пылегазоочистки. Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 271 с.
7. Шиляев М.И., Хромова Е.М., Богомолов А.Р. Интенсификация тепло- массообмена в дисперсных средах при конденсации и испарении. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2010. 272 с.
8. Шиляев М.И., Толстых А.В. Моделирование процессов абсорбции газов в барботажных аппаратах // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20, № 3. С. 575–587.
9. Шиляев М.И., Хромова Е.М., Дорошенко Ю.Н. Типовые примеры расчета систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха: учеб. пособие. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2012. 288 с.
10. Пеняевский В.В. Развитие универсального метода расчета инерционных пылеуловителей для каскадных систем: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2013. 133 с.
11. Темникова Е.Ю. Исследование эффективности пылеулавливания в циклоне с рельефными поверхностями: дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2010. 131 с.

12. Shilyaev M.I., Bogomolov A.R., Khromova H.M., Tolstykh A.V., Shirokova S.N. The system of calculation for intergrated inertial – condensation – absorption dust and gas cleaning of flue gases of heat power plants // The 13-th Asian Symposium on Visualization: Proceedings, 22-26 June 2015. Novosibirsk, 2015. – URL: [//itam.nsc.ru/conferences/13asv/pdf/095_Silyaev et al.pdf](http://itam.nsc.ru/conferences/13asv/pdf/095_Silyaev et al.pdf). (Дата обращения: 10.12.16)

Шиляев Михаил Иванович, д-р техн. наук, проф.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Хромова Елена Михайловна, канд. физ.-мат. наук, доц.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Дорошкина Александра Анатольевна, студ.

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 29.12.16

Shilyaev Mikhail Ivanovich, DSc, Professor

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

Khromova Elena Mikhaylovna, PhD, Ass. Professor

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

Doroshkina Aleksandra Anatol'evna, Student

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

CALCULATION OF MULTI-STAGE INERTIAL-CONDENSATION-ABSORPTION OF DUST AND GAS PURIFICATION OF INDUSTRIAL EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE

Part 1. A UNIVERSAL METHOD FOR CALCULATING INERTIAL DUST TRAPS AND CASCADES OF THEM

It presents a universal method of calculation (UMC) inertial dust collectors (DC) as a single, and in a cascade arrangement. For single units of domestic and foreign listed database on the main characteristics responsible for fractional efficiency and their coefficients of hydraulic resistance and universal nomogram, which allows to calculate 52 different types of devices. An example of selecting the type and calculation of cyclones NIIOGAZ based on UMR and energy principle (EP) comparing DC and cascades of them in terms of specific energy consumption for dust removal for the first, dry flue gas cleaning stage of a three-stage zolounosa integrated inertial-condensation-absorption of dust and gas purification. A great update for EP DC cascades weight particle size distribution function of the general form.

К e y w o r d s: inertia precipitators, scrubbers nozzle type, foam and bubble machines centrifugal, multi-stage dust and gas cleaning, irrigation camera AC.

REFERENCES

1. Shilyaev M.I., Shilyaev A.M., Grishchenko E.P. Metody rascheta pyleuloviteley [Methods for calculating the precipitators]. Tomsk, Publishing TSUAB, 2006. 385 p. (in Russian)
2. Shilyaev M.I. Metody rascheta pyleulavlivayushchikh sistem [Methods for calculating the dust collecting systems]. Moscow, 2014. 320 p. (in Russian)

3. Shilyaev M.I. Aerodinamika i teplomassoobmen gazodispersnykh potokov [The aerodynamics and heat and mass transfer of gas-dispersion]. Moscow, 2015. 288 p. (in Russian)
4. Shilyaev M.I., Khromova E.M. Capture of fine dust in jet scrubbers. Mass transfer in multiphase systems and its applications. Vienna, Austria: In Tech, 2011. Pp. 311–335.
5. Shilyaev M.I., Khromova E.M. Modeling of heat and mass transfer and absorption-condensation dust and gas cleaning in jet scrubbers. Mass Transfer – advances in sustainable energy and environment oriented numerical modeling. Vienna, Austria: In Tech, 2013. Pp. 163–194.
6. Shilyaev M.I., Khromova E.M., Tolstykh A.V. Kontaktnyy teplo- i massoobmen v forsunochnykh i barbotazhnykh apparatakh. Modelirovaniye, optimizatsiya teplomassoobmena i absorbtionno-kondensatsionnoy pylegazochistki [Contact heat and mass transfer in the nozzle and bubble platemaking machines. Simulation, optimization of heat and mass transfer and absorption and condensation of gas treatment]. Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 271 p. (in Russian)
7. Shilyaev M.I., Khromova E.M., Bogomolov A.R. Intensifikatsiya teplomassoobmena v dispersnykh sredakh pri kondensatsii i isparenii [The intensification of heat and mass transfer in disperse media during condensation and evaporation]. Tomsk, Publishing TSUAB, 2010. 272 p. (in Russian)
8. Shilyaev M.I., Tolstykh A.V. Modelirovaniye protsessov absorbtii gazov v barbotazhnykh apparatakh [Modelling of processes of gas absorption in bubble machines]. Teplofizika i aeromehanika [Thermophysics and Aeromechanics]. 2013. T. 20, No. 3. Pp. 575–587. (in Russian)
9. Shilyaev M.I., Khromova E.M., Doroshenko Yu.N. Tipovye primery rascheta sistem otopleniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukh [Typical examples of calculation of heating, ventilation and air-conditioning: a tutorial]. Tomsk, Publishing TSUAB, 2012. 288 p.
10. Penyavskiy V.V. Razvitiye universal'nogo metoda rascheta inertsionnykh pyleuloviteley dlya kaskadnykh sistem: dis. kand. tekhn. nauk [The development of a universal method for calculating inertial dust collectors for cascade systems: dis. cand. tehn. sciences]. Tomsk, 2013. 133 p. (in Russian)
11. Temnikova E.Yu. Issledovanie effektivnosti pyleulavlivaniya v tsiklone s rel'efnymi poverkhnostyami: dis. kand. tekhn. nauk [Research dust collection efficiency in the cyclone with embossed surfaces: dis. cand. tehn. sciences]. Kemerovo, 2010. 131 p. (in Russian)
12. Shilyaev M.I., Bogomolov A.R., Khromova H.M., Tolstykh A.V., Shirokova S.N. The system of calculation for integrated inertial – condensation – absorption dust and gas cleaning of flue gases of heat power plants // The 13-th Asian Symposium on Visualization: Proceedings, 22–26 June 2015. Novosibirsk, 2015. URL: [/itam.nsc.ru/conferences/13asv/pdf/095_Silyaev et al.pdf](http://itam.nsc.ru/conferences/13asv/pdf/095_Silyaev et al.pdf). (date of access: 10.12.16).

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ



УДК 621.542.001

Ю.Э. МАЛЫШЕВА, Д.Э. АБРАМЕНКОВ, А.С. ДЕДОВ, М.С. МАЛЫШЕВ,
Э.А. АБРАМЕНКОВ

КЛАССИФИКАЦИОННЫЕ ПРИЗНАКИ-ЭЛЕМЕНТЫ ЦИЛИНДРА-КОРПУСА ПНЕВМАТИЧЕСКИХ УДАРНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Рассматриваются предложения по классификационным признакам-элементам для цилиндров-корпусов пневматических механизмов применительно к машинам ударного действия любого назначения.

Ключевые слова: камера формирования силового импульса, управляемая камера, воздухоподвод, воздухоотвод.

Введение. Классификации пневматических ударных механизмов (ПУМ) [1, 2] предусматривают рассмотрение средств формирования силового импульса посредством камер-полостей, реализующих рабочий и холостой ход ударника (группа A [1]), а также камер-полостей, участвующих в подготовке энергоносителя (сжатого воздуха) с заданными рабочими характеристиками и непосредственно не участвующих в формировании силового импульса (группа B [1]). Подразумевается, что камеры-полости могут размещаться как последовательно по оси цилиндра-корпуса, так и радиально относительно его оси. Классификации ПУМ [1, 2] рассматривают также камеры-полости, формирующие характерные рабочие процессы, изменяющие свойства основных силовых импульсов посредством введения признаков-элементов: наддува (группа C [2]); запуска (D [1, 2]; перепуска (E [1, 2]); задержки (F [1]); вытеснения части воздуха (G [1]); форсажа (H [1, 2]); продувки (I [2]); выпуска (K [1, 2]).

В данной работе иллюстраций к описаниям особенностей конструктивного исполнения не приводится. Подробности о конструктивном исполнении цилиндров-корпусов можно выяснить в соответствии со ссылкой в библиографическом списке. Порядок размещения признаков-элементов в таблице объясним хронологией появления их в технической литературе и патентных публикациях. Размещение, например, от простого к сложному или в обратном порядке было бы условным по двум причинам. Во-первых, патентные материалы могут нарушить очередность из-за более длительного

© Малышева Ю.Э., Абраменков Д.Э., Дедов А.С., Малышев М.С., Абраменков Э.А.,
2017

их рассмотрения и более поздней публикации. Во-вторых, конструктивное исполнение признаков-элементов зависит от их технологических свойств, метода изготовления, наличия соответствующего оборудования и инструмента.

Классификации признаков-элементов предусматривают применение одно- и многокамерных цилиндров со стороны как рабочего, так и холостого ходов ударника-поршня. Конструктивное решение цилиндра-корпуса диктуется исполнением основной функции назначения ПУМ: создание, с одной стороны, необходимого по очертанию (форме) и величине (содержанию) силового импульса, с другой – соответствующего конструктивного решения ударника-поршня, реализующего созданный силовой импульс.

Относительно средств стабилизации значений параметров воздуха (группа В [1, 2]) следует отметить, что их расположение аналогично средствам формирования силового импульса (группа А [1, 2]), они могут комбинироваться с дополнительными динамическими признаками-элементами (*a* – камера-ресивер; *b* – камера-перепуска; *c* – камера форсажа непроточная; *d* – камера форсажа проточная; *e* – предкамера (сетевая); *f* – камера проточная наддува неуправляемая; *g* – камера проточная наддува управляемая; *h* – камера непроточная с присоединенным объемом неуправляемая; *i* – камера непроточная с присоединенным объемом управляемая [1, 2]), а также с их основными конструктивными признаками-элементами В от *a* (1–6) до *i* (1–6). Такое комбинирование возможно со всеми основными динамическими признаками-элементами от С (*a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g*, *h*, *i*, *j*) до К (*a*–*j*).

Отметим, что применение гладких и ступенчатых цилиндров-корпусов в золотниковых и клапанных ПУМ известно со второй половины XIX в. [3], в дроссельных ПУМ – с 1969 г. [4], а в струйных – с 1971 г. [5]. Рассматриваемые признаки-элементы могут быть использованы для аналогичных процессов в беззолотниковых, бесклапанных и других системах воздухораспределения ПУМ.

Наиболее характерные особенности конструктивных признаков-элементов цилиндра-корпуса ПУМ. В ПУМ 1877 г. [6] представлен двухступенчатый цилиндр-корпус. В большей ступени расположена основная поршневая часть ступенчатого ударника-поршня с камерой рабочего хода и кольцевой камерой холостого хода. В меньшей ступени со стороны хвостовика инструмента размещена камера атмосферного давления. В стенках цилиндра-корпуса каналы впуска в камеры рабочего и холостого ходов из кольцевой камеры-ресивера образованы выточкой на ударнике-поршне. Каналы впуска из камер объединены в один выпускной канал и так же, как канал впуска воздуха из сети в камеру-ресивер, выполнены в стенке цилиндра-корпуса.

Во втором варианте [6] цилиндр-корпус укороченный ступенчатый и подобно первому варианту камера атмосферного давления расположена со стороны хвостовика. Камера сетевого воздуха, она же камера холостого хода сообщена с камерой рабочего хода каналом впуска в стенке цилиндра-корпуса. Выпуск отработавшего воздуха из камеры рабочего хода осуществляется через выпускной канал аналогично первому варианту. Камера-ресивер в выточке ударника-поршня отсутствует.

В ПУМ 1879 г. [7] цилиндр-корпус четырехступенчатый. Со стороны хвостовика инструмента расположена радиальная кольцевая камера атмо-

сферного давления. Камера со стороны крышки, в зависимости от положения ударника, выполняет функции от распределительной камеры (камеры сетевого давления) до пневматического буфера (камеры торможения). Это решение предопределило исполнение ударника-поршня со штоковыми окончаниями со стороны его торцов и конструкцию цилиндра-корпуса. Поршневая часть ударника-поршня со стороны хвостовика осуществляет функции камеры холостого хода, а кольцевая камера со стороны распределительной камеры – камеры атмосферного давления, постоянно сообщенной с окружающей средой.

В ПУМ 1883 г. [8] цилиндр-корпус двухступенчатый с камерой атмосферного воздуха со стороны штоковой части ступенчатого ударника-поршня и хвостовика инструмента. ПУМ содержит выпускную кольцевую камеру, периодически сообщающуюся с камерой рабочего хода, размещенной со стороны поршневой части ступенчатого ударника-поршня. Кольцевая радиальная камера сетевого воздуха расположена на штоковой части цилиндра-корпуса и периодически соединяется с кольцевой камерой холостого хода и камерой рабочего хода посредством каналов в теле ударника-поршня.

ПУМ 1889 г. [9] содержит цилиндр-корпус с тремя ступенями различных диаметральных размеров, две из которых штоковые. Со стороны меньшей штоковой части ступенчатого ударника-поршня расположена камера сетевого воздуха, она же камера рабочего хода. Со стороны хвостовика инструмента размещена камера атмосферного давления. Кольцевая камера холостого хода со стороны большей штоковой части цилиндра-корпуса периодически сообщается с камерой сетевого давления и атмосферой посредством каналов в стенке цилиндра-корпуса. Кольцевая камера со стороны меньшей штоковой части ударника-поршня постоянно соединена каналом в стенке цилиндра-корпуса с атмосферой.

В ПУМ 1902 г. [10] цилиндр-корпус ступенчатый с радиальной кольцевой камерой сетевого воздуха (ресивера), которая, в зависимости от положения ударника-поршня, сообщается с камерами рабочего и холостого ходов. Со стороны хвостовика инструмента в штоковой части ударника-поршня выполнена камера атмосферного давления, постоянно сообщенная с окружающим пространством.

В ПУМ 1902 г. [11] цилиндр-корпус трехступенчатый с кольцевыми камерами со стороны хвостовика инструмента. Ступени образованы пропточками.

В ПУМ 1908 г. [12] цилиндр-корпус содержит шесть радиальных кольцевых камер. Камера со стороны хвостовика инструмента постоянно сообщена с атмосферой и предназначена для разгрузки кольцевой управляемой камеры холостого хода. Две управляемые кольцевые камеры со стороны рабочего хода, в зависимости от положения ступенчатого ударника-поршня, изменяют свои функциональные свойства последовательно от аккумуляционных и управляемых до свойств камеры пневматического буфера. Первая кольцевая камера сетевого воздуха постоянно сообщена с атмосферой, вторая – с сетью сжатого воздуха. Каналы воздухоподвода в камеры рабочего и холостого ходов выполнены в ударнике-поршне.

В ПУМ 1930 г. [3] цилиндр-корпус содержит четыре кольцевые камеры. Камера со стороны хвостовика инструмента постоянно сообщена с атмосферой и предназначена для разгрузки двух аккумуляционных радиальных кольцевых камер, которые, в зависимости от положения ступенчатого ударника-поршня, изменяют свои функциональные свойства от аккумуляционных, управляемых и пневматического буфера до тормозной камеры. Камеры периодически сообщаются между собой и кольцевой камерой атмосферного давления через канал в ударнике-поршне. Кольцевая камера сетевого воздуха является камерой холостого хода и постоянно посредством канала в стенке цилиндра-корпуса соединена с кольцевой радиальной тормозной камерой.

В ПУМ 1969 г. [13] цилиндр-корпус содержит пять радиальных кольцевых камер, четыре из которых камеры рабочего и холостого ходов с увеличенными объемами, с впуском из камеры сетевого воздуха через каналы воздухоподвода в ударнике-поршне. Радиальная кольцевая камера со стороны хвостовика инструмента выполняет функции аккумуляционной камеры и периодически – выпускной камеры, сообщаясь с призабойным пространством посредством каналов выпуска и продувки в ударнике-поршне и хвостовике. Кольцевая камера между камерами рабочего и холостого ходов осуществляет функции перепускной камеры (канала) между ними и аккумуляционной камерой со стороны хвостовика.

В ПУМ 1970 г. [14] цилиндр-корпус содержит восемь радиальных кольцевых камер, сообщенных с сетевой камерой и между собой винтовым ударником-поршнем. Одна из радиальных кольцевых управляемых камер со стороны хвостовика инструмента периодически соединяется посредством лыски на ударнике-поршне с винтовыми камерами с призабойным пространством через канал в хвостовике, а противоположная ей – с сетевой камерой.

В ПУМ 1971 г. [15] цилиндр-корпус содержит девять радиальных кольцевых камер, из которых шесть осуществляют функции камер рабочего и холостого ходов. Впускные каналы цилиндра выполнены сходящимися в один продольный канал, постоянно сообщенный с каналом выпуска в хвостовике. Камеры рабочего и холостого ходов сообщаются периодически посредством двух отдельных радиальных кольцевых перепускных камер, в зависимости от положения многоступенчатого ударника-поршня, ступени которого образованы на его боковой поверхности выточками и проточками со стороны его торцов. Перешейки содержат каналы для впуска воздуха в камеры рабочего хода из камеры сетевого воздуха в штоковой части ударника-поршня.

В ПУМ 1981 г. [16] цилиндр-корпус снабжен двумя радиальными кольцевыми камерами, одна из них аккумуляционная, за счет которой часть выпускаемого воздуха из камеры рабочего хода отводится через канал в ступенчатом ударнике-поршне, а вторая часть – через выпускную камеру, постоянно сообщенную с атмосферой. При этом выпускная камера разделена перегородками-выточками на несколько радиальных кольцевых камер в виде ярусов, объединенных общим выпускным каналом.

В ПУМ 1989 г. [17] цилиндр-корпус содержит две радиальные кольцевые камеры со стороны камеры рабочего хода, которые сообщены с сетью и разделены перешейком, причем в зависимости от положения ударника-поршня

их функции изменяются. Так, камера в крышке изменяет функции в рабочем процессе от аккумуляционных до частичного вытеснения воздуха к концу холостого хода. Канал вытеснения воздуха выполнен в стенке цилиндра-корпуса. Камера в виде выточки в цилиндре-корпусе осуществляет функции от аккумуляционной до форсажной.

В ПУМ 1999 г. [18] ступенчатые с винтовыми пазами впуска и перепуска воздуха цилиндры-корпусы взаимодействуют с гладкими поверхностями или с винтовыми пазами ударников-поршней. Винтовые пазы в цилиндрах-корпусах, а также на поршневых и штоковых частях ударников-поршней имеют одинаковую или разную направленность. Такие сочетания признаков-элементов выполнены и в конструкциях втулок цилиндров-корпусов, взаимодействующих со штоковыми частями ударников-поршней. Винтовые пазы позволяют получить закручивающие потоки воздуха, что способствует интенсивному наполнению рабочих камер в цилиндре-корпусе.

В ПУМ 2011 г. [19] цилиндр-корпус гладкий со стороны камеры рабочего хода и с выточкой со стороны хвостовика инструмента. Цилиндр-корпус со стороны рабочего хода снабжен фигурными форсажными каналами, соединяющими камеру с кольцевой камерой между стаканом и цилиндром-корпусом. Фигурные каналы прямоугольные, треугольные, трапециoidalные, ромбовидные и круглые, вписанные в указанные формы. Геометрические оси каналов выполнены параллельно образующей цилиндра или под острым углом к ней. Такие решения позволяют управлять впуском воздуха, создавая резкие или плавные процессы впуска воздуха. Подобные каналы можно выполнить со стороны камеры холостого хода в качестве каналов выпуска.

В ПУМ 2015 г. [20], синтезированном с применением известных признаков-элементов [1], шесть камер: торцевая предкамера (может быть в крышке цилиндра-корпуса); кольцевая дополнительная предкамера между цилиндром-корпусом и стаканом; две кольцевые камеры со стороны полости рабочего хода – торможения (пневматического буфера), соединенные постоянно с аккумуляционной камерой и кольцевой дополнительной предкамерой; две кольцевые радиальные камеры со стороны полости холостого хода – задняя и передняя перепускные камеры. Все кольцевые радиальные камеры разделены перешейками с диаметральным размером ударника-поршня. Передняя перепускная камера осуществляет функции камеры холостого хода и сообщается, в зависимости от положения ударника-поршня, с аккумуляционной камерой и камерой торможения.

В ПУМ 2015 г. [21] торцевая предкамера в крышке цилиндра-корпуса сообщается с кольцевой аккумуляционной камерой. В цилиндре-корпусе со стороны полости рабочего хода кольцевая радиальная камера торможения соединяется с торцевой камерой, а кольцевая радиальная распределительная камера – с кольцевой аккумуляционной камерой; со стороны полости холостого хода кольцевая радиальная камера-выточка в цилиндре-корпусе со стороны хвостовика инструмента сообщается с кольцевой радиальной распределительной камерой, в зависимости от положения ударника-поршня, через канал-паз или канал-лыску на его боковой поверхности. Все кольцевые

радиальные камеры разделены перешейками с размерами диаметрального сечения ударника-поршня.

В ПУМ 2016 г. [22] цилиндр-корпус выполнен аналогично [21] и содержит три кольцевые радиальные камеры: со стороны полости рабочего хода – камеру пневматического буфера и распределительную камеру; со стороны полости холостого хода – выточку, которая осуществляет функции камеры холостого хода и сообщается постоянно с торцевой предкамерой посредством дроссельного канала в трубке. Подобные кольцевые радиальные камеры выполнены со стороны полости рабочего хода. Различные качественные свойства в рабочем процессе ПУМ предопределяются камерами с различными функциями. Например, в техническом решении ПУМ [20] распределительная камера сообщается с торцевой предкамерой через камеру торможения, в зависимости от положения ударника-поршня, а в [21] соединена с камерой пневматического буфера непосредственно.

Принципиальные различия технических решений цилиндра-корпуса в рассмотренных ПУМ являются достаточными и позволяют представить их оригинальные решения в виде конструктивных уточняющих признаков-элементов, приведенных в таблице с обозначением звездочкой (*).

Классификационные конструктивные признаки-элементы цилиндра-корпуса

Код	Средство, формирующее силовой импульс	Код	Конструктивный признак	Код	Уточняющий конструктивный признак
1	2	3	4	5	6
[1, 2]	Цилиндр-корпус	1*	Бесступенчатый*	a*	Внутренний одноклапанный
				b*	Внутренний многоклапанный
				c*	Без радиальных каналов
				d*	С радиальными каналами
				e*	Со смешанными каналами
				f*	Без выточек
				g*	С выточками
				h*	Без проточек
				i*	С проточками
				j*	Без пазов
				k*	С прямыми пазами
				l*	С наклонными пазами
				m*	С винтовым пазом однозаходным
				n*	С винтовым пазом многозаходным
				p*	С пазом сложного сечения (формы)
				q*	С коленчатым пазом
				r*	С продольными каналами в стенке
				s*	С отверстием для хвостовика
				t*	Без отверстия для хвостовика

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6
		2*	Ступенчатый	To же $a^* - t^*$	
		3*	С радиальными камерами	»	
		4*	С последовательными камерами	»	
		5*	С смешанными камерами	»	
		6*	С ярусами каналов	»	
		7*	Цельный	»	
		8*	Составной	»	
		9*	С секциями одного диаметра	»	
		01*	С секциями различных диаметров	»	
		02*	Точечный	»	
		03*	Литой	»	
		04*	С ярусами камер не соединенные	»	
		05*	С ярусами камер соединенные	»	
		06*	С ярусами камер частично соединенные	»	

Особенности исполнения кольцевых камер и их учет при расчете параметров ПУМ. ПУМ с несколькими коаксиальными камерами, вскрытыми со стороны основного канала цилиндра-корпуса, как правило, перекрываются ударником-поршнем, длина которого по отсекающим торцам больше ширины выточки коаксиальной камеры. Камеры имеют свои средства воздухоподвода и воздухоотвода, осуществляющие последовательное ступенчатое наполнение и опорожнение, сжатие и расширение имеющегося в них воздуха и воздуха, поступающего в процессе их функционирования. Такое конструктивное решение признаков-элементов в рабочем процессе ПУМ позволяет рационально преобразовать внутреннюю энергию сжатого воздуха в механическую энергию ударника-поршня. Свободное геометрическое сечение дросселей впуска в ПУМ с коаксиальным расположением камер ударником-поршнем не перекрывается в случаях диаметральных выточек и является постоянным. Перекрытие ударником-поршнем камеры будут заполняться воздухом интенсивнее, поскольку их объемы незначительны, и иметь давление воздуха до величины близкого или равного сетевому. При сообщении камер посредством канала-дросселя впуска или перепуска, которые могут иметь различные формы очертаний, давление воздуха в них выравнивается.

Выводы. 1. Представленная классификация уточняющих конструктивных признаков-элементов цилиндра-корпуса позволяет применять их для получения многообразных качественных свойств ПУМ.

2. Классификация конструктивных признаков-элементов дает возможность использовать весь комплекс динамических признаков-средств [1, 2] без нарушения связей между динамическими и конструктивными признаками-элементами и признаками-средствами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А б р а м е н к о в Э.А., А б р а м е н к о в Д.Э. Пневматические механизмы машин ударного действия: дроссельные, струйные, беззолотниковые, бесклапанные: справ. пособие. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1993. 430 с.
2. Кутумов А.А., А б р а м е н к о в Д.Э., А б р а м е н к о в Э.А. Навесные пневматические молоты для разработки мерзлых грунтов: моногр. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2008. 376 с.
3. Рееle R. Compressed air blast production, Eransission and use of compressed air. N.Y.; L., 1930. 521 р.
4. А.с. 247179 СССР. МПК В25D. Пневматический молоток / Н.А. Клушин, Э.А. Абраменков, Д.Г. Суворов, В.М. Бирюков; заявл. 18.05.66; опубл. 04.07.69; Бюл. № 22.
5. А.с. 281358 СССР. Пневматический молоток / П.А. Маслаков, Э.А. Абраменков, Н.А. Клушин; заявл. 19.11.69; опубл. 14.09.71; Бюл. № 29.
6. Pat. 1057 DE. Steuerungsvorrichtung an Gesteinbohrmaschinen / Y. Darlington; publ. 1877.
7. Pat. 7920 DE. Neuerungen an der Steuerung von Gesteinbohrmaschinen / W.L. Neill; publ. 1879.
8. Pat. 22901 DE. Neuerung an Gesteinbohrmaschinen ohne Steuermechanismus / R. Mayer; publ. 1883.
9. Pat. 48541 DE. Gesteinbohrmaschinen mit stofson dem Werzeng für gasförmige Betriebsflüssigkeit / A.B. Drantz; publ. 1889.
10. Pat. 133792 DE. Ventilloser Gesteinbohrer mit besonderen Ein- und Auslafsöffnungen an jedem Cylinderende und einer gemeinsamen Eintrittsöffnung für beide Gylingerenden / Rand Drill Co; publ. 1902.
11. Pat. 711859 USA. Pneumatic tool / W.M. Holden; publ. 1902.
12. Baril M.A. Note sur les frappeurs pneumatiques // Revue de Mecanique. 1908. Т. 22. Р. 421–436.
13. Беляев Н.А., Есин Н.А., Зиновьев А.А., Чернилов Э.Г. Новые двухкамерные пневмоударники // Пневмогидравлические силовые импульсные системы. Новосибирск: ИГД СО АН СССР, 1969. С. 17–21.
14. А.с. 269100 СССР. Пневматический ударный механизм / Г.И. Суксов, Ж.Г. Мухин, О.И. Бобров и др.; заявл. 18.03.1969; опубл. 17.04.1970; Бюл. № 15.
15. А.с. 299648 СССР. Многокамерный пневмоударник / Ж.Г. Мухин, Г.И. Суксов, В.Г. Россов, О.И. Бобров; заявл. 03.11.1969; опубл. 26.03.1971; Бюл. № 12.
16. А.с. 857468 СССР. Пневматический молоток / Э.А. Абраменков, Ю.И. Лебедев, Л.Л. Лысенко, В.А. Щербаков; заявл. 16.10.1978; опубл. 23.08.1981; Бюл. № 31.
17. А.с. 1460233 СССР. Пневматический молоток с дроссельным воздухораспределением / Э.А. Абраменков, Д.Э. Абраменков, А.Г. Богаченков и др.; заявл. 30.01.1987; опубл. 23.02.1989; Бюл. № 7.
18. А б р а м е н к о в Д.Э., А б р а м е н к о в Э.А., М а л ы ш е в С.А., Н а д е и н А.А., П р у ш к о в с к и й К.В., С е р о х в о с т о в С.А. Динамические и конструктивные признаки средств впуска в пневмоударных механизмах // Изв. вузов. Строительство. 1999. № 7. С. 132–143.
19. Пат. РФ 2417874. МПК B25D 9/04 B21C 37/24, B25D 17/06. Пневматический молот с дроссельным воздухораспределением / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, Г.В. Гладышев, В.Ю. Еременко, А.А. Кутумов, Ю.Э. Малышева, М.А. Федоров; заявл. 27.10.2008; опубл. 10.05.2011; Бюл. № 13.
20. А б р а м е н к о в Д.Э., А б р а м е н к о в Э.А., Д е д о в А.С., Д м и т р и е в М.П., М а л ы ш е в М.С., Ч о е н О л з и й б а я р. Пневмоударный механизм с перепуском между камерами рабочего и холостого хода и его физико-математическое описание // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 8. С. 57–67.

21. Дмитриев М.П., Абраменков Д.Э., Гайдучик М.И., Гэндэн Баттулга, Малышев М.С., Абраменков Э.А. Пневматический ударный механизм молота с аккумуляционной и тормозной камерами и его физико-математическое описание // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 9. С. 54–66.
22. Дмитриев М.П., Абраменков Д.Э., Гвоздев В.А., Абраменков Э.А. Пневматический ударный механизм молота с распределительной камерой, камерой форсажа и камерой торможения и его физико-математическое описание // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 1. С. 74–83.

Малышева Юлия Эдуардовна, ведущий инж.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Абраменков Дмитрий Эдуардович, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Дедов Алексей Сергеевич, канд. техн. наук, доц.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Малышев Максим Сергеевич, инж.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Абраменков Эдуард Александрович, д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 02.12.16

Malysheva Yuliya Eduardovna, Leading Engineer

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Abramenkov Dmitriy Eduardovich, DSc, Professor

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Dedov Aleksey Sergeevich, PhD, Ass. Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Malyshev Maksim Sergeevich, Engineer

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

Abramenkov Eduard Alexandrovich, DSc, Professor

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

CLASSIFICATION FEATURES ELEMENTS CYLINDER-BODY

PNEUMATIC HAMMER MECHANISM

Proposals on the classification criteria elements for pneumatic impact mechanisms packages of cylinders with respect to the machines Impact of any multi-purpose.

К e y w o r d s: camera power pulse forming, control cameras, air supply, air bleed.

REFERENCES

1. А б р а м е н к о в Е.А., А б р а м е н к о в Д.Е. Pnevmaticheskie mekhanizmy mashin udarnogo deystviya: Spravochnoe posobie [Pneumatic mechanisms of impact machines: Handbook]. Novosibirsk, Izd-vo Novosib. gos. un-ta [Publishing house of Novosibirsk State University], 1993. 430 p. (in Russian)
2. К у т у м о в А.А., А б р а м е н к о в Д.Е., А б р а м е н к о в Е.А. Navesnye pnevmaticheskie moloty dlya razrabotki merzlykh gruntov: Monografiya [Mounted pneumatic hammers for the development of frozen soils. Monograph]. Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), 2008. 376 p. (in Russian)
3. Peele R. Compressed air blast production, Eransission and use of compressed air. N.Y., L., 1930. 521 p.

4. A.s. 247179 СССР. Pnevmaticheskiy molotok [Pneumatic hammer]. N.A. Klushin, E.A. Abramov, D.G. Suvorov, V.M. Birukov; appl. 18.05.1966; publ. 04.07.1969; Bull. No. 22. (in Russian)
5. A.s. 281358 СССР. Pnevmaticheskiy molotok [Pneumatic hammer]. P.A. Maslakov, E.A. Abramov, N.A. Klushin; appl. 19.11.1969; publ. 14.09.1971; Bull. No. 29. (in Russian)
6. Pat. 1057 DE. Steuerungsvorrichtung an Gesteinbohrmaschinen. Y. Darlington; publ. 1877.
7. Pat. 7920 DE. Neuerungen an der Steuerung von Gesteinbohrmaschinen. W.L. Neill; publ. 1879.
8. Pat. 22901 DE. Neuerung an Gesteinbohrmaschinen ohne Sternermechanismus. R. Mayer; publ. 1883.
9. Pat. 48541 DE. Gesteinbohrmaschinen mit stofson dem Werzeng für gasförmige Betriebsflüssigkeit. A.B. Drautz; publ. 1889.
10. Pat. 133792 DE. Ventilloser Gesteinbohrer mit besonderen Ein- und Auslafsöffnungen an jedem Cylinderende und einer gemeinsamen Eintrittsöffnung für beide Cylinderenden. Rand Drill Co; publ. 1902.
11. Pat. 711859 USA. Pneumatic tool. W.M. Holden, publ. 1902.
12. Baril M.A. Note sur les frappeurs pneumatiques // Revue de Mecanique. 1908. T. 22. Pp. 421–436.
13. Belyayev N.A., Esin N.A., Zinov'yev A.A., Chernilov E.G. Novye dvukhkamernye pnevmoudarniki [New double-chamber pneumatic punches]. Pnevmodravlicheskie silovye impul'snye sistemy [Pneumatic-hydraulic power pulse systems]. Novosibirsk: IGD SO AN СССР, 1969. Pp. 17–21. (in Russian)
14. A.s. 269100 СССР. Pnevmaticheskiy udarnyy mekhanizm [Pneumatic hammer mechanism]. G.I. Suksov, Zh.G. Mukhin, O.I. Bobrov i dr.; appl. 18.03.1969; publ. 17.04.1970; Bull. No. 15. (in Russian)
15. A.s. 299648 СССР. Mnogokamernyy pnevmoudarnik [Multi-air hammer]. Zh.G. Mukhin, G.I. Suksov, V.G. Rossou, O.I. Bobrov; appl. 03.11.1969; publ. 26.03.1971; Bull. No. 12. (in Russian)
16. A.s. 857468 СССР. Pnevmaticheskiy molotok [Pneumatic hammer]. E.A. Abramov, Yu.I. Lebedev, L.L. Lysenko, V.A. Shcherbakov; appl. 16.10.1978; publ. 23.08.1981; Bull. No. 31. (in Russian)
17. A.s. 1460233 СССР. Pnevmaticheskiy molotok s drossel'nym vozdukhораспределением [Pneumatic hammer with throttle air distribution]. E.A. Abramov, D.E. Abramov, A.G. Bogachenkov i dr.; appl. 30.01.1987; publ. 23.02.1989; Bull. No. 7. (in Russian)
18. Abramov D.E., Abramov E.A., Malyshev S.A., Nadein A.A., Prushkovskiy K.V., Serokhostov S.A. Dinamicheskie i konstruktivnye priznaki sredstv vpuska v pnevmoudarnykh mekhanizmakh [Dynamic and structural characteristics of the means of production in pneumatic impact mechanisms]. Izv. vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 1999. No. 7. Pp. 132–143. (in Russian)
19. Pat. RU 2417874. MPK B25D 9/04 B21C 37/24, B25D 17/06. Pnevmaticheskiy molot s drossel'nym vozdukhораспределением [Pneumatic hammer with throttle air distribution]. D.E. Abramov, E.A. Abramov, G.V. Gladyshev, V.Yu. Eremenko, A.A. Kutumov, Yu.E. Malysheva, M.A. Fedorov; appl. 27.10.2008; publ. 10.05.2011; Bull. No. 13. (in Russian)
20. Abramov D.E., Abramov E.A., Dedov A.S., Dmitriev M.P., Malyshev M.S., Choyen Olziybayar. Pnevmodarnyy mekhanizm s perepuskom mezhdu kamerami rabochego i kholostogo khoda i ego fiziko-matematicheskoe opisanie [Pneumatic percussion mechanism with a bypass between the chambers

- of the working and idling, and its physical and mathematical description]. Izv. vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 8. Pp. 57–67. (in Russian)
21. Dmitriyev M.P., Abramakov D.E., Gaiduchick M.I., Genden Battulga, Malyshев M.S., Abramakov E.A. Pnevmaticheskiy udarnyy mekhanizm molota s akkumulyatsionnoy i tormoznoy kamerami i ego fiziko-matematicheskoe opisanie [Air percussion mechanism of hummer with charging and breaking chambers, and its physical and mathematical description]. Izv. vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 9. Pp. 54–66. (in Russian)
22. Dmitriyev M.P., Abramakov D.E., Gvozdев V.A., Abramakov E.A. Pnevmaticheskiy udarnyy mekhanizm molota s raspredelitel'noy kameroy, kameroy forsazha i kameroy tormozheniya i ego fiziko-matematicheskoe opisanie [Air percussion mechanism of hummer with the distributive chamber, forsing chamber and breaking chamber and its physico-mathematical description]. Izv. vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 1. Pp. 74–83. (in Russian)
-

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ



УДК 72.01.001.572

В.В. ТАЛАПОВ

ОБ ОБЩЕЙ СХЕМЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА СТРОИТЕЛЬСТВА

Работа посвящена изучению состава и взаимосвязей основных компонентов информационной модели здания. Приводится описание общей схемы такой модели и поясняются их взаимосвязи, характерные для всех стадий жизненного цикла объекта строительства, а также описывается облако точек как необходимый элемент информационной модели.

Ключевые слова: объект строительства, информационное моделирование, BIM, информационная модель, облако точек.

В основополагающей работе Чарльза Истмана и других авторов по BIM [1] приведено несколько определений этой технологии работы со зданиями и дано ее подробное описание. Однако в появлявшихся в разное время публикациях на тему информационного моделирования почти ничего не говорилось о составе информационной модели объекта строительства. На сегодняшний день технология BIM получила достаточноное развитие, поэтому пришло время восполнить имеющийся пробел.

Информационное моделирование – это процесс, результаты каждого этапа которого, т. е. информационные модели здания, сильно отличаются друг от друга в зависимости от стадии жизненного цикла объекта и тех требований, которые предъявляются к моделированию при решении возникающих задач [2]. Да и сам строительный объект сильно зависит от стадии своего существования: если при проектировании он виртуален, а во время строительства постепенно обретает «телесный» вид, то на долгом этапе эксплуатации здание наконец входит в пору «стабильности» и уже не подвержено значительным изменениям [3]. Так что информационная модель – объект весьма переменчивый, зависящий от круга решаемых задач. И все же наработанный опыт использования BIM позволяет говорить о некоторой общей структуре информационной модели здания.

В работе [4] приводится структура информационной модели памятника архитектуры. Однако внимательное ее рассмотрение позволяет сделать вывод, что такая схема построения модели с необходимыми пояснениями пригодна и для информационного моделирования любого объекта строи-

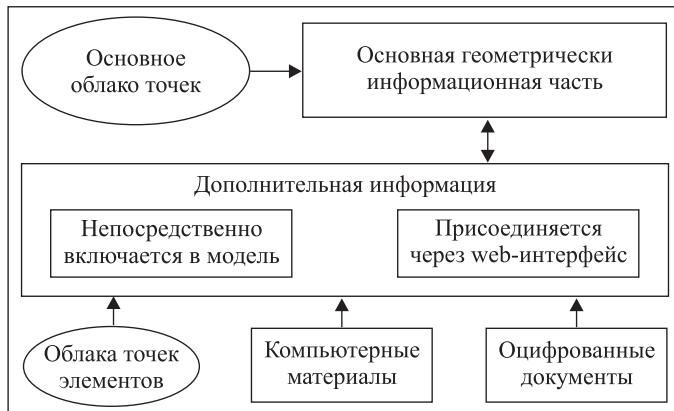


Рис. 1. Информационная модель объекта строительства: ее составные части и связи между ними

тельства, вне зависимости от того, на какой стадии жизненного цикла он находится.

Итак, ссылаясь на работу [4], рассмотрим приведенную там схему информационной модели памятника архитектуры применительно к любому объекту строительства (рис. 1).

Такая модель по общепринятой классификации считается гибридной, поскольку состоит из компьютерных объектов разной природы и предназначения [2]. Руководствуясь основными принципами BIM [5], дадим к этой схеме некоторые пояснения.

Основная геометрически информационная часть – важный раздел модели, является:

- 1) непосредственным хранилищем некоторой геометрически схематической и иной информации об объекте;
- 2) основой для качественного и количественного анализа объекта;
- 3) интерфейсом доступа к информации модели, в том числе и находящейся в других ее частях.

Геометрически информационная часть – основной «контейнер» модели, который наполняется информацией непосредственно или через привязанные ссылки. Главные задачи этого контейнера – организация структуры хранения информации и предоставление возможности интерактивной работы с ней, а также пространственная (преимущественно трехмерная) визуализация основной части этой информации. При этом инструментарий обработки информации в модели не содержится, он целиком представлен в программе (программах) работы с моделью (или ее частями) и постоянно совершенствуется вне зависимости от модели. Это полностью соответствует принципам информационного моделирования [5].

В основной части модели в первую очередь содержится схематическая геометрия объекта. Конечно, хотелось бы сказать – геометрическая модель, но дело в том, что такой, выстроенный современными векторными инструментами компьютерного моделирования, виртуальный объект при всей своей обязательной точности будет все же весьма приближено соответствовать реальной геометрии существующего здания и, например, совершенно непригоден для геодезического контроля. Так что правильнее говорить о схеме или

о геометрической модели, понимая под ней геометрически информационную часть (геометрическую схему построения объекта), всегда подразумевая, что у нее есть определенные неизбежные «допуски» при передаче реальной геометрии.

Схематическая геометрия, во-первых, обеспечивает описание взаимодействия (соединения) составных элементов объекта строительства. Она может использоваться, в частности, для создания схемы расчетов устойчивости здания к внешним нагрузкам, а также при возможной эксплуатации или при проектировании реставрации либо капитального ремонта [6]. Если же говорить о стадии проектирования, когда физически объект еще не существует, то геометрически информационная часть может практически полностью совпадать со всей информационной моделью здания [7]. Во-вторых, геометрическая модель – это своеобразный трехмерный «путеводитель» по информации об объекте строительства, предоставляющий и облегчающий визуальный контакт пользователя с заложенными в модель данными (рис. 2, 3).

Основное облако точек – это результат лазерного сканирования или фотограмметрической обработки объекта. Такое облако точек, реализованное набором их трехмерных координат, – обязательный элемент информационной модели, являющийся носителем «реальных» данных о геометрии объекта. Технологически облако точек хранится отдельно и привязывается к геометрической модели ссылкой, но при необходимости оно может вставляться в геометрическую модель. Именно сравнение полученных в разное время облаков точек позволяет осуществлять геодезический контроль за объектом строительства, как существующим, так и возводимым, и количественно характеризовать динамику процессов строительства и эксплуатации.

Что касается стадии проектирования или даже предпроектной проработки объекта, то и здесь облако точек при необходимости может присутствовать, например, в качестве съемки участка местности и объектов окружения.

Дополнительная информация может как непосредственно включаться в модель (например, свойства материалов, коды по классификатору, характеристики оборудования и т.п.), так и присоединяться ко всей модели или конкретному элементу ссылками (например, схема шкантов и скоб при креплении выделенного бревна, инструкции по эксплуатации оборудования, нормативные документы и т.п.). К дополнительной информации можно отнести и всевозможные исторические, разрешительные, имущественные и прочие документы на здание, которые могут храниться отдельно как в силу формата документа, так и из-за удаленности от самой модели или статуса этих единиц хранения. Например, если исторический документ находится в каком-то музее, но его оцифрованный вариант доступен в модели через ссылку на сайт этого музея.

Аналогичным образом к модели присоединяются, например, схемы используемого в здании оборудования или регламенты по его обслуживанию. Эти документы вообще могут храниться на сайте производителя оборудования и прикрепляться к модели ссылками, что гарантирует актуальность

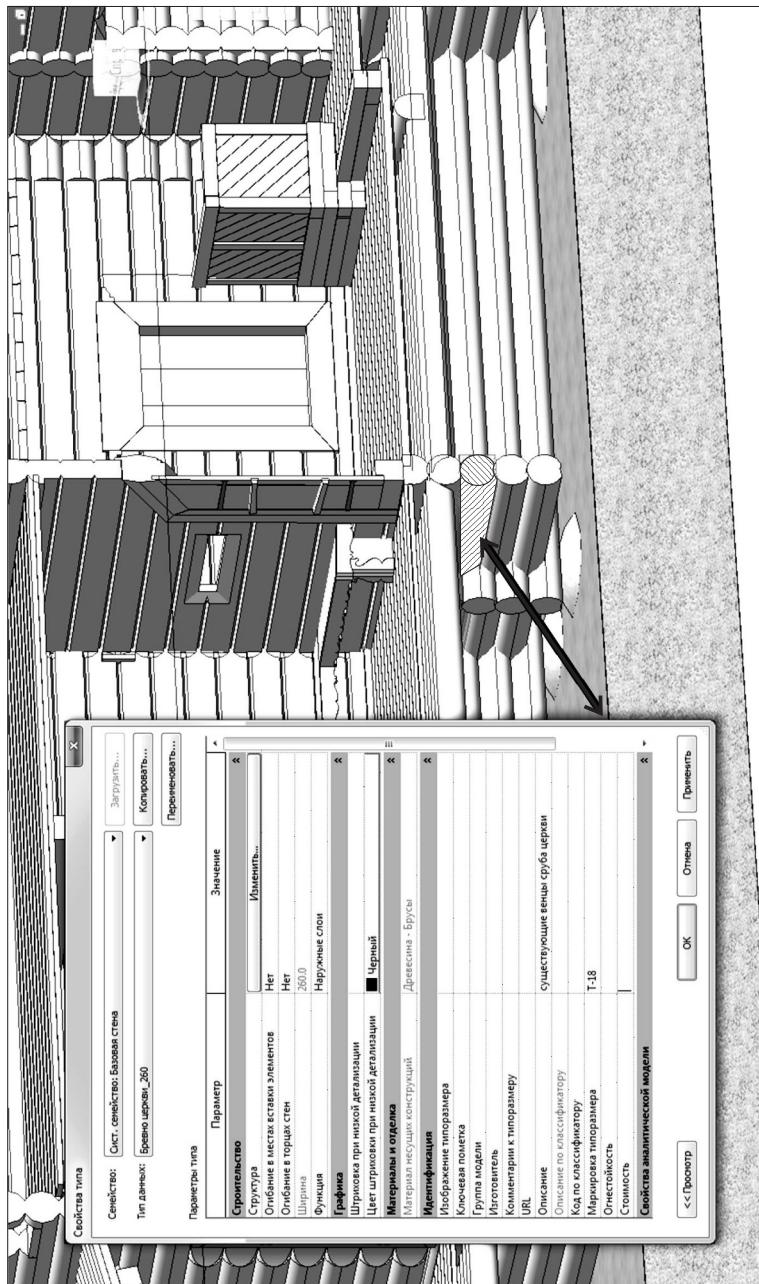


Рис. 2. Информационная модель Зашиверской церкви: один из элементов геометрической модели и открывшееся диалоговое окно доступа к его свойствам (заложенным в модель данным) [8]

всей перечисленной документации. Последнее особенно важно при совмещении BIM с концепцией «зеленого строительства» [10].

Исключительно важная часть дополнительной информации для каждого элемента здания – его индивидуальное облако точек, которое содержит точную геометрию отдельного элемента (его видимой части) и позволяет осуществлять индивидуальный геодезический контроль (для каждого бревна, балки, колонны и т.п.).

Сегодня информация по объекту строительства – это индивидуальное «личное дело» каждого здания или сооружения, хранящееся в «отдельной

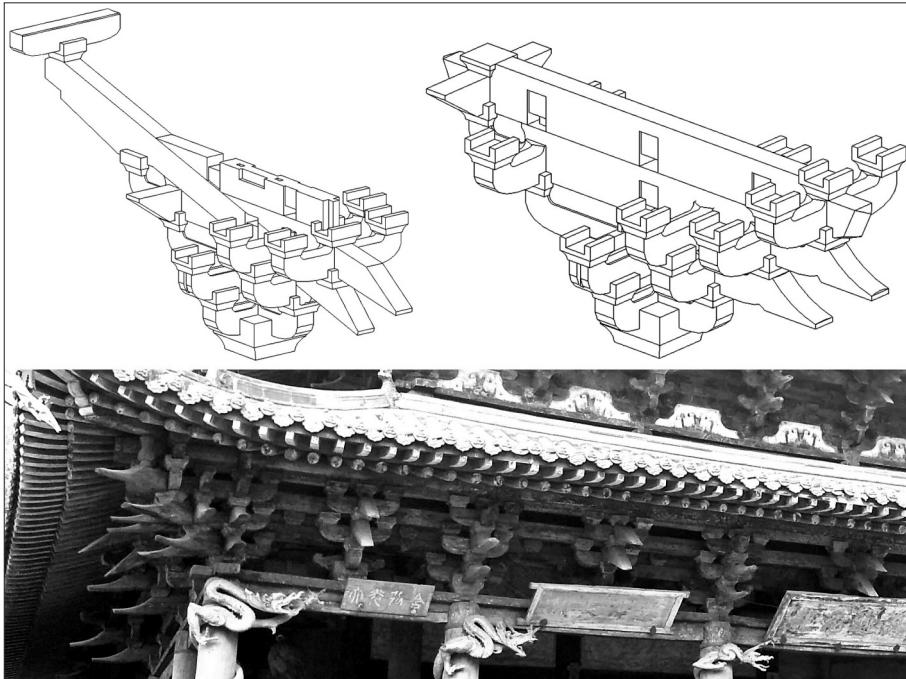


Рис. 3. Информационная модель храма Шенмудянь в Китае: узлы системы доугун первого и второго этажей из модели показывают «идеальную» схему сборки кронштейнов, но они не передают реального состояния каждого из них [9]

папке», и для знакомства с нею надо в эту папку заглянуть. Поэтому вполне логично, что одним из главных критериев оптимизации процессов работы со зданиями является уменьшение суммарного времени, потраченного на поиск, проработку и согласование этой информации. Если информационная модель правильно организована, то она позволяет тратить при работе с объектом строительства принципиально меньше времени, получая при этом намного большую эффективность.

Конечно, моделирование каждого объекта строительства весьма индивидуально как по специфике сооружения, так и по характеру решаемых задач. Но понимание общей схемы построения информационной модели здания позволяет экономить время при организации индивидуального процесса моделирования и создавать основу для объединения информационных моделей отдельных объектов в единую информационную систему, в частности, является обязательным шагом к реализации концепции «умного города».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook. Second edition. N.Y.: Wiley, 2011. 626 p.
2. Талапов В.В. Технология BIM: суть и основы внедрения информационного моделирования зданий. М.: ДМК-пресс, 2015. 410 с.
3. Талапов В.В. Основы BIM: введение в информационное моделирование зданий. М.: ДМК-пресс, 2011. 396 с.

4. Талапов В.В. О некоторых закономерностях и особенностях информационного моделирования памятников архитектуры // Международный электронный научно-образовательный журнал «AMIT» 2015. № 2(31). URL: <http://www.marhi.ru/AMIT/2015/2kvert15/talapov/abstract.php>
5. Талапов В.В. О некоторых принципах, лежащих в основе BIM // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 4. С. 108–114.
6. Козлова Т.И., Куликова С.О., Талапов В.В., Чжан Гуанин. BIM и памятники деревянной архитектуры // Историческая информатика. Барнаул. 2014. № 2–3. С. 50–73.
7. Jernigan F. BIG BIM little bim. Second edition. Salisbury: 4 Site Press, 2008. 198 p.
8. Козлова Т.И. Методика информационного моделирования Спасской церкви из Зашиверска и преимущества ее применения для сохранения памятников древнерусского деревянного зодчества // Баландинские чтения. Ч. 1. Новосибирск, 2015. С. 26–31.
9. Талапов В.В., Чжан Гуанин. Информационное моделирование памятников архитектуры на примере древнекитайской системы доугун. Новосибирск: НГУАДИ, 2016. 183 с.
10. Krygiel E., Niec B. Green BIM: Successful sustainable design with building information modeling. N.Y.: Wiley, 2008. 310 p.

Талапов Владимир Васильевич, канд. физ.-мат. наук, доц.;

E-mail: talapoff@yandex.ru

Новосибирский государственный университет архитектуры, дизайна и искусств

Получено 13.12.16

Talapov Vladimir Vasil'evich, PhD, Ass. Professor; E-mail: talapoff@yandex.ru
Novosibirsk State University of Architecture, Design and Art, Russia

ABOUT THE GENERAL SCHEME OF THE INFORMATION MODEL OF CONSTRUCTION OBJECT

The article is devoted to the study of the composition and interrelationships of major components of the building information model. This article provides a description of the general scheme of this model and explains their relationship, characteristic of all stages of the life cycle of the construction object, and also describes the point cloud as an essential element of the information model.

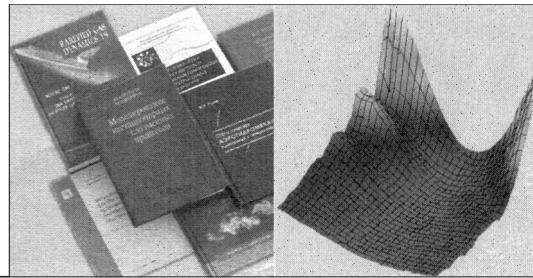
К e y w o r d s: the object of building, information modeling, BIM, information model, point cloud.

REFERENCES

1. Eastman C., Teicholz P., Sacks R., Liston K. BIM Handbook. Second edition. N.Y. Wiley, 2011. 626 p.
2. Talapov V.V. Tekhnologiya BIM: sut' i osnovy vnedreniya informatsionnogo modelirovaniya zdaniy [BIM technology: the essence and the basics of implementing building information modeling]. Moscow, 2015. 410 p. (in Russian)
3. Talapov V.V. Osnovy BIM: vvedenie v informatsionnoe modelirovanie zdaniy [Basic BIM: Introduction into building informational modeling]. Moscow, 2011. 396 p. (in Russian)

4. Talapov V.V. O nekotorykh zakonomernostyakh i osobennostyakh informatsionnogo modelirovaniya pamyatnikov arkhitektury [Some regularities and features of information modeling of monuments]. Available at:
<http://www.marhi.ru/AMIT/2015/2kvert15/talapov/abstract.php> (in Russian)
 5. Talapov V.V. O nekotorykh printspakh, lezhashchikh v osnove BIM [Some of the principles underlying the BIM]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 4. Pp. 108–114. (in Russian)
 6. Kozlova T.I., Kulikova S.O., Talapov V.V., Zhang Guanying. BIM i pamiatniki derevyannoy arkhitektury [BIM and the monuments of wooden architecture]. Istoricheskaya informatika [Historical Informatics]. Barnaul, 2014. No. 2–3. Pp. 50–73. (in Russian)
 7. Jernigan F. BIG BIM little bim. Second edition. Salisbury: 4 Site Press, 2008. 198 p.
 8. Kozlova T.I. Metodika informatsionnogo modelirovaniya Spasskoy tserkvi iz Zashiverska i preimushchestva ee primeneniya dlya sokhraneniya pamyatnikov drevnerusskogo derevyannogo zodchestva [The technique of information modeling of the Saviour Church of Zashiversk and benefits of its application for the preservation of monuments of ancient wooden architecture]. Balandinskie chteniya [Balandinskaya reading, p. 1]. Novosibirsk, 2015. Pp. 26–31. (in Russian)
 9. Talapov V.V., Zhang Guanying. Informatsionnoe modelirovaniye pamyatnikov arkhitektury na primere drevnekitayskoy sistemy dougun [Information modeling architectural monuments on the example of the Ancient Chinese system dougun]. Novosibirsk, 2016. 183 p. (in Russian)
 10. Krygiel E., Niec B. Green BIM: Successful sustainable design with building information modeling. N.Y. Wiley, 2008. 310 p.
-

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 697.442.8.001.24

А.Г. БАГОУТДИНОВА, Я.Д. ЗОЛОТОНОСОВ

РАСЧЕТ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗМЕЕВИКОВЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ» С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ РАДИУСОМ ИЗГИБА ВИНТОВОЙ СПИРАЛИ

Предложен ряд змеевиковых теплообменных аппаратов типа «труба в трубе» с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали. Разработан алгоритм расчета таких аппаратов, реализованный в виде программы на языке программирования системы компьютерной математики MATLAB. В результате численной реализации определены теплогидродинамические характеристики аппаратов и установлена эффективность инновационного теплообменного оборудования.

Ключевые слова: теплообмен, змеевик, винтовая спираль.

Введение. Проблема создания компактных трубчатых теплообменных аппаратов в настоящее время является весьма актуальной задачей, так как они более просты в изготовлении, обладают низкой стоимостью и допускают возможность работы при высоких температурах и давлениях [1]. В связи с этим, авторами [2] предложена серия инновационных змеевиковых теплообменников типа «труба в трубе», внешний контур которых имеет различную конфигурацию (рисунок). Аппараты этого типа снабжены одной внутренней трубой или скомпонованы по аналогии с известными многосекционными аппаратами [3], а размещение труб в трубных плитах осуществляется по шестиугольникам, квадратам или концентрическим окружностям [4].

В целях перспектив промышленного освоения теплообменников этого класса проведем инженерный расчет и оценим их теплогидродинамические характеристики.

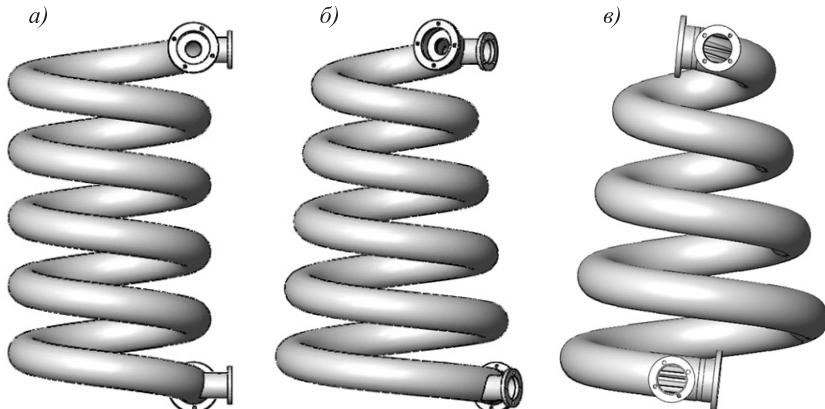
Гидродинамический и тепловой расчет в криволинейном канале, как правило, производится по формулам для прямолинейного канала с учетом поправочного коэффициента

$$\alpha_{\text{из}} = \varepsilon \alpha_{\text{пр}},$$

где $\alpha_{\text{из}}$, $\alpha_{\text{пр}}$ – коэффициенты теплоотдачи в изогнутом и прямом канале, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;

ε – поправочный коэффициент, вычисляемый по одной из формул [5–8].

© Багоутдинова А.Г., Золотоносов Я.Д., 2017



Змеевиковые теплообменники типа «труба в трубе»
a) цилиндрический; б) конический; в) конический секционный

Впервые такой подход при обработке опытных данных был реализован в работе [5], где поправочный коэффициент рассчитывался по формуле:

$$\varepsilon = 1 + 3,54 \frac{d}{2R}, \quad (1)$$

здесь d – внутренний диаметр канала, м;

R – радиус кривизны канала, м.

Согласно данным [6], величина поправочного коэффициента в турбулентной области может быть определена из соотношения

$$\varepsilon = 1 + \frac{21}{Re^{0.14}} \left(\frac{d}{2R} \right)^{0.48}, \quad (2)$$

где Re – критерий Рейнольдса.

В последующем установлено, что результаты расчета поправочного коэффициента по (1) и (2) совпадают при $Re > 10^5$.

Сопоставив большое количество литературных данных, авторы [7] пришли к выводу, что отношение $0,5d/R$ в (2) необходимо возвести в степень с показателем 0,5–0,75. В работе [8] предложено вычислять поправочный коэффициент ε по формуле

$$\varepsilon = 1 + \frac{1,96}{Re^{0,088}} \left(\frac{d}{R} \right)^{0,01}, \quad (3)$$

где $0,01 \leq d/R \leq 1$, $10^4 \leq Re \leq 10^5$.

Следует отметить, что в настоящее время нет общепризнанного соотношения для расчета поправочного коэффициента ε , однако в инженерных расчетах широкое распространение получило выражение (1), предложенное в работе [5].

В связи с тем, что в змеевиковых аппаратах (рисунок, б, в) изменяется радиус изгиба винтовой спирали, для расчета теплогидродинамических характеристик нами предлагается использовать метод температурных интервалов, как один из легкореализуемых в практике инженерных расчетов.

1. Метод температурных интервалов. Исходными данными для расчета теплообменников методом температурных интервалов являются температура греющей воды на входе t'_{g1} , температура нагреваемой воды на входе t'_{g2} и выходе t''_{g2} , расходы греющей воды G_1 и нагреваемой воды G_2 , геометрические размеры труб. Конечной задачей инженерного расчета является определение коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи, площади поверхности теплообмена и теплогидродинамических характеристик аппарата.

Расчет проводится по следующему алгоритму:

1. Перепад температур в нагреваемой жидкости разбивается на N равных интервалов. Длина температурного интервала равна $\Delta t = (t''_{g2} - t'_{g2})/N$.

2. На каждом температурном интервале $[t_{i-1}; t_i]$, по уравнению теплового баланса рассчитывается температура на выходе для греющего теплоагента и количество передаваемой теплоты Q_i . Определяются коэффициенты теплоотдачи α_{1i} , α_{2i} (с учетом поправочного коэффициента), теплопередачи k_i , поверхность теплообмена F_i и перепад давления ΔP_i , $i = 1, \dots, N$.

3. Вычисляются параметры теплообменника:

$$F = \sum_{i=1}^n F_i \text{ -- общая площадь теплообмена;}$$

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \text{ -- перепад давления по аппарату;}$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n \alpha_{1i} F_i \text{ -- коэффициент теплоотдачи для межтрубного пространства;}$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n \alpha_{2i} F_i \text{ -- коэффициент теплоотдачи для трубного пространства;}$$

$$k = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^n k_i F_i \text{ -- коэффициент теплопередачи.}$$

2. Пример расчета теплообменника методом температурных интервалов. Рассмотрим конический секционный водо-водяной змеевиковый теплообменник типа «труба в трубе» (рисунок, в), угол конусности которого равен $\varphi = \pi/15$, а меньший диаметр $D_{3M}^1 = 0,2$ м.

Пусть нагреваемая вода движется по четырем ($n = 4$) стальным трубам диаметром $d_2/d_1 = 23/20$ мм и нагревается от $t'_{g2} = 5$ °С до $t''_{g2} = 55$ °С. Ее расход составляет $G_2 = 4740$ кг/ч.

Греющая вода движется противотоком по каналу между трубами и имеет температуру на входе $t'_{g1} = 95$ °С, ее расход составляет $G_1 = 9414$ кг/ч.

Внутренний диаметр внешней трубы $D = 80$ мм.

Перепад температур разобъем на интервалы с шагом $\Delta t = 10$ °С.

Рассмотрим интервал 55 – 45 °С. Вычислим поправочные коэффициенты по формуле (1) и количество передаваемой теплоты:

– в межтрубном пространстве

$$\varepsilon_1 = 1 + 3,54 \cdot D / D_{3M}^1 = 1 + 3,54 \cdot 0,08 / 0,2 = 2,416;$$

– в трубном пространстве

$$\varepsilon_2 = 1 + 3,54 \cdot d_1 / D_{3M}^1 = 1 + 3,54 \cdot 0,02 / 0,2 = 1,354;$$

$$Q_1 = G_2 c_{p2} (t''_{g2} - t'_{g2}) = 4740 \cdot 4,19(55 - 45) / 3600 = 55,168 \text{ кВт.}$$

Температура греющей воды на выходе

$$t''_{g1} = t'_{g1} - \frac{Q_1}{G_1 c_{p1}} = 95 - \frac{55,168 \cdot 3600}{9414 \cdot 4,19} = 89,965 \text{ }^{\circ}\text{C} \approx 90 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Находим среднеарифметические значения температур теплоносителей и значения физических свойств воды при этих температурах:

$$t_{g1} = 0,5(t'_{g1} + t''_{g1}) = 92,5 \text{ }^{\circ}\text{C}; \quad t_{g2} = 0,5(t'_{g2} + t''_{g2}) = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

$$\rho_{g1} = 962 \text{ кг/м}^3; \quad v_{g1} = 0,31768 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad \lambda_{g1} = 0,6812 \text{ Вт/(м} \cdot {^{\circ}\text{C}}\text{)};$$

$$\rho_{g2} = 990 \text{ кг/м}^3; \quad v_{g2} = 0,556 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$\lambda_{g2} = 0,648 \text{ Вт/(м} \cdot {^{\circ}\text{C}}\text{)}; \quad Pr_{g2} = 3,54.$$

Скорости движения теплоносителей:

$$w_1 = \frac{4G_1}{\rho_{g1}\pi(D^2 - nd_2^2)3600} = 0,808 \text{ м/с}; \quad w_2 = \frac{4G_2}{n\rho_{g2}\pi d_1^2 3600} = 1,058 \text{ м/с.}$$

Эквивалентный диаметр межтрубного пространства

$$d_{eqv} = \frac{4S}{P} = \frac{D^2 - nd_2^2}{D + nd_2} = \frac{0,08^2 - 4 \cdot 0,023^2}{0,08 + 4 \cdot 0,023} = 0,0249 \text{ мм.}$$

Число Рейнольдса для греющей воды $Re_{g1} = w_1 d_{eqv} / v_{g1} = 6,3345 \cdot 10^4$.

Режим течения воды турбулентный. Вычислим число Нуссельта

$$Nu_{g1} = 0,017 Re_{g1}^{0,8} Pr_{g1}^{0,4} \left(\frac{Pr_{g1}}{Pr_{cl}} \right)^{0,25} \left(\frac{D}{d_{eqv}} \right)^{0,18}.$$

Так как температура стенки неизвестна, то в первом приближении задаемся значением $t_{cl} \approx 0,5(t_{g1} + t_{g2}) = 0,5(92,5 + 50) = 71,25 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

При этой температуре $Pr_{cl} = 2,5$, тогда

$$Nu_{g1} = 0,017 Re_{g1}^{0,8} Pr_{g1}^{0,4} \left(\frac{Pr_{g1}}{Pr_{cl}} \right)^{0,25} \left(\frac{D}{d_{eqv}} \right)^{0,18} = 175,37.$$

Коэффициент теплоотдачи от греющей воды к стенке трубы

$$\alpha_{11} = \varepsilon_1 Nu_{g1} \frac{\lambda_{g1}}{d_{eqv}} = \frac{2,416 \cdot 175,37 \cdot 0,6812}{2,49 \cdot 10^{-2}} = 11588 \text{ Вт/(м}^2 \cdot {^{\circ}\text{C}}\text{)}.$$

Число Рейнольдса для нагреваемой воды $Re_{g2} = w_2 d_1 / v_{g2} = 3,8069 \cdot 10^4$.

Вычислим число Нуссельта при турбулентном течении

$$\text{Nu}_{g2} = 0,021 \text{Re}_{g2}^{0,8} \text{Pr}_{g2}^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_{g2}}{\text{Pr}_{c2}} \right)^{0,25}.$$

Приняв в первом приближении $t_{c2} \approx t_{c1}$ и, следовательно, $\text{Pr}_{c2} \approx \text{Pr}_{c1} \approx 2,5$, получим $\text{Nu}_{g2} = 182,1$.

Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к нагреваемой воде

$$\alpha_{21} = \varepsilon_2 \text{Nu}_{g2} \frac{\lambda_{g2}}{d_1} = \frac{1,354 \cdot 182,1 \cdot 0,648}{2 \cdot 10^{-2}} = 7989 \text{ Вт/(м}^2 \cdot {^\circ}\text{C}).$$

Коэффициент теплопередачи

$$k_1 = \left(\frac{1}{\alpha_{11}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_{21}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{11588} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{45} + \frac{1}{7989} \right)^{-1} = 4085 \text{ Вт/(м}^2 \cdot {^\circ}\text{C}).$$

Вычислим среднеарифметическую разность температур

$$\Delta t_a = t_{g1} - t_{g2} = 92,5 - 50 = 42,5 \text{ } {^\circ}\text{C}.$$

Плотность теплового потока $q_1 = k_1 \Delta t_a = 4085 \cdot 42,5 = 1,736 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$.

Площадь поверхности нагрева $F_1 = \frac{Q_1}{q_1} = \frac{54,958 \cdot 10^3}{1,736 \cdot 10^5} = 0,3167 \text{ м}^2$.

Температуры поверхностей стенок трубы:

$$t_{c1} = t_{g1} + \frac{q_1}{\alpha_{11}} = 92,5 + \frac{1,736 \cdot 10^5}{11588} = 107,48 \text{ } {^\circ}\text{C};$$

$$t_{c2} = t_{g2} - \frac{q_1}{\alpha_{21}} = 50 - \frac{1,736 \cdot 10^5}{7989} = 28,27 \text{ } {^\circ}\text{C}.$$

При этих температурах $\text{Pr}_{c1} = 1,63$, $\text{Pr}_{c2} = 5,65$ поправки на изменение физических свойств жидкости по сечению потока имеют значения:

$$(\text{Pr}_{g1}/\text{Pr}_{c1})^{0,25} = (1,8957/1,63)^{0,25} = 1,038 \text{ (в расчете было принято 0,932);}$$

$$(\text{Pr}_{g2}/\text{Pr}_{c2})^{0,25} = (3,54/5,65)^{0,25} = 0,8897 \text{ (в расчете было принято 1,09).}$$

Совпадение достаточно точное; можно принять, что $F_1 = 0,3167 \text{ м}^2$.

$$\text{Длина труб } l_1 = \frac{F_1}{\pi n d_1} = \frac{0,3167}{3,14 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 10^{-2}} = 1,26 \text{ м.}$$

Перепад давления в межтрубном пространстве:

$$\lambda_{11} = \frac{0,316}{\text{Re}_1^{0,25}} = \frac{0,316}{(6,3345 \cdot 10^4)^{0,25}} = 0,0199;$$

$$\Delta P_{11} = \varepsilon_1 \lambda_{11} \frac{l_1}{d_{eqv}} \frac{\rho w_1^2}{2} = 2,416 \cdot 0,0199 \frac{1,26}{2,49 \cdot 10^{-2}} \frac{962 \cdot 0,808^2}{2} = 764 \text{ Па.}$$

Перепад давления в трубном пространстве:

$$\lambda_{21} = \frac{0,316}{\text{Re}_2^{0,25}} = \frac{0,316}{(3,8063 \cdot 10^4)^{0,25}} = 0,0226;$$

$$\Delta P_{21} = \varepsilon_{21} \lambda_{21} \frac{l_1 \rho w_2^2}{d_1} = 1,354 \cdot 0,0226 \frac{1,26}{2 \cdot 10^{-2}} \frac{994 \cdot 1,058^2}{2} = 1072,5 \text{ Па.}$$

Общий перепад давления с учетом трубного и межтрубного пространства на первом температурном интервале

$$\Delta P_1 = \Delta P_{11} + \Delta P_{21} = 1836,5 \text{ Па.}$$

Диаметр большего основания змеевика для рассматриваемого температурного интервала $D_{3m}^2 = 0,3322 \text{ м.}$

Аналогично проведем расчеты для других интервалов, сведем расчетные данные в табл. 1 и вычислим общие характеристики аппарата.

Т а б л и ц а 1. Характеристики аппарата по температурным интервалам

Числовые характеристики	Интервал температур, °C				
	55–45	45–35	35–25	25–15	15–5
ε_1	2,416	1,8525	1,6732	1,5762	1,1282
ε_2	1,354	1,2131	1,1883	1,144	1,5129
$Q_i, \text{kВт}$	55,168	54,95	55	55	55,3
$w_1, \text{м/с}$	0,808	0,805	0,802	0,799	0,797
$w_2, \text{м/с}$	1,058	1,054	1,051	1,049	1,048
Re_{g1}	63 345	59 845	56 340	52 837	49 366
Re_{g2}	38 069	31 991	26 109	2085	16 046
Nu_{g1}	175,37	169	163	156	150
Nu_{g2}	182,1	176	170	163	157
$\alpha_{1i}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	11 588	8536,4	7389	6655	6084
$\alpha_{2i}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	7989	6780	6122	5597	5085
$k_i, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	4085	3356	3012	2761	2536
$F_i, \text{м}^2$	0,3167	0,3451	0,3485	0,34805	0,3497
$l_i, \text{м}$	1,26	1,37	1,3866	1,3849	1,3914
$\Delta P_{1i}, \text{Па}$	764	648	598	563	557
$\Delta P_{2i}, \text{Па}$	1072	1082	1105	1142	1209
$\Delta P_i, \text{Па}$	1836	1730	1703	1705	1766
$D_{3m}, \text{м}$	0,3322	0,421	0,4915	0,5582	0,6065

Перепад давления $\Delta P = 1836,5 + 1730,5 + 1703 + 1705 + 1766 = 8741 \text{ Па};$
 площадь теплообмена $F = 0,3167 + 0,3451 + 0,3485 + 0,34805 + 0,3497 = 1,71 \text{ м}^2;$
 средневзвешенный коэффициент теплоотдачи:

для межтрубного пространства

$$\alpha_1^* = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^5 \alpha_{1i} F_i = 7983 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C});$$

для трубного пространства

$$\alpha_2^* = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^5 \alpha_{2i} F_i = 6282 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C});$$

коэффициент теплопередачи

$$k^* = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^5 k_i F_i = 3132 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}).$$

Таким образом, диаметр D_{3M}^1 меньшего основания змеевика равен 0,2 м, диаметр большего D_{3M}^6 – 0,6065 м, количество витков – 4, длина змеевика $l = F / (\pi n d_1) = 1,71 / (3,14 \cdot 4 \cdot 0,02) = 6,8$ м. Высота аппарата – 0,7 м.

Предложенный алгоритм расчета конических змеевиковых аппаратов реализован в виде программы компьютерной математики MATLAB.

3. Методы оценки эффективности теплообмена. В настоящее время в литературе существует довольно широкий спектр методов оценки теплогидравлической эффективности аппаратов теплообмена [3, 9–11].

В работе [3] для оценки эффективности теплообмена предлагается использовать энергетический критерий $\eta = \alpha / N$, где α – коэффициент теплоотдачи со стороны горячего или холодного теплоносителя; N – мощность, затрачиваемая на прокачку теплоносителя с той же стороны.

В работе [9] в качестве критериев оценки эффективности теплообмена используются объемы или поверхности теплообмена двух аппаратов при одинаковых тепловых мощностях и мощностях, затрачиваемых на прокачку теплоносителя

$$V/V_0 = (\xi/\xi_0)_{Re}^{0,4} / (\text{Nu}/\text{Nu}_0)_{Re}^{1,4}. \quad (4)$$

В работе [10] в качестве оценки эффективности предложен коэффициент I , характеризующий теплообмен в интенсифицированном канале при равной с гладким каналом мощности, потребной для преодоления гидравлических сопротивлений.

В справочнике [3] М.В. Кирпичев для оценки эффективности поверхности теплообмена рекомендовал использовать энергетический коэффициент E , равный отношению количества тепла, отданного поверхностью, к работе на перекачку теплоносителя.

В.И. Антуфьев [11] предложил более удобную форму записи энергетического коэффициента E , как отношение этого коэффициента к единице поверхности и единичному температурному напору ($\Delta t = 1$ °C), т. е. исключается влияние величины температурного напора.

4. Условия и результаты сопоставления. Рассмотрим теплообменные аппараты: цилиндрический змеевик (с постоянным радиусом изгиба винтовой спирали), конический змеевик (с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали) и секционный конический змеевик, в котором теплоагент движется по четырем трубам. Первый теплообменник часто применяется в качестве водоподогревателя в тепловых пунктах систем теплоснабжения. Последние два разрабатываются для аналогичных условий работы.

Сравним рассматриваемые змеевиковые теплообменники, по их эффективности, используя подход [9]. Так как целью интенсификации теплообмена является уменьшение теплообменной поверхности, то и оценивать ее необ-

ходимо по этому параметру. Однако, поскольку при интенсификации теплопередачи, как правило, возрастают скорости теплоносителей и соответственно коэффициенты сопротивления, оценку эффективности необходимо производить при равных между собой затратах на прокачку и условии равенства входных и выходных температур теплоносителей, расходы которых находятся в одном и том же соотношении.

Результаты вычислений характеристик для однотрубных змеевиков приведены в табл. 2, для секционных – в табл. 3.

Т а б л и ц а 2. Характеристики змеевиковых аппаратов

Параметр	Цилиндрический змеевик	Конический змеевик			
		$\varphi = \pi/10$	$\varphi = \pi/12$	$\varphi = \pi/18$	$\varphi = \pi/20$
d_1 , м	0,032	0,032	0,032	0,032	0,032
D , м	0,048	0,048	0,048	0,048	0,048
D_{3M}^1 , м	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2
D_{3M}^N , м	0,6	0,6	0,55	0,45	0,43
G_1 , кг/ч	3988,8	3922,3	3919,1	3906,1	3880,3
G_2 , кг/ч	2008,6	1975,1	1973,4	1966,9	1953,9
Q , кВт	117	115,5	115	114	113
α_1 , Вт/(м ² · К)	10 089	11 212	11 434	11 905	11 970
α_2 , Вт/(м ² · К)	4068	4408	4473	4608	4622
k , Вт/(м ² · К)	2643	2855	2896	2987	2994
F , м ²	0,845	0,78	0,769	0,745	0,74
l , м	8,409	7,769	7,65	7,4	7,33

Т а б л и ц а 3. Характеристики секционных змеевиковых аппаратов

Параметр	Цилиндрический секционный змеевик	Конический секционный змеевик			
		$\varphi = \pi/10$	$\varphi = \pi/12$	$\varphi = \pi/18$	$\varphi = \pi/20$
d_1 , м	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
D , м	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
D_{3M}^1 , м	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2
D_{3M}^N , м	0,6	0,76	0,69	0,56	0,53
G_1 , кг/ч	11 767	11 622	11 650	11 622	11 622
G_2 , кг/ч	5925,3	5852,1	5866,6	5852	5852,1
Q , кВт	345,5	339,8	340,6	340	339,8
α_1 , Вт/(м ² · К)	7814,5	8606	8871	9417	9563
α_2 , Вт/(м ² · К)	6987	7194	7283	7439	7483
k , Вт/(м ² · К)	3284	3448	3512	3636	3669
F , м ²	2,08	1,92	1,885	1,82	1,8
l , м	7,985	7,62	7,5	7,23	7,16

Здесь температура нагреваемой воды изменяется от 5 до 55 °С. Греющий теплоагент имеет температуру на входе 95 °С, на выходе 70 °С. Равенство перепадов давлений достигается варьированием расходов теплоносителей в разрабатываемых аппаратах.

Согласно расчетам, поверхность теплообмена конических змеевиков сокращается на 8–15 %.

Выводы. Анализ результатов показывает, что при равных затратах на прокачку теплоносителей конические теплообменники являются более эффективными по сравнению с известными цилиндрическими змеевиками, так как для достижения необходимых теплогидродинамических показателей они имеют меньшую поверхность теплообмена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дрейцер Г.А. Проблемы создания компактных трубчатых теплообменных аппаратов // Теплоэнергетика. 1995. № 3. С. 11–18.
2. Багаутдинова А.Г., Золотоносов Я.Д. Змеевиковые теплообменники. Моделирование. Расчет. Казань: КГАСУ, 2016. 245 с.
3. Бажан П.И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. М.: Машиностроение, 1989. 367 с.
4. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие для вузов. 10-е изд. Л.: Химия, 1987. 576 с.
5. Jeschke H. Warmeubergang und Druckverlust in Rohrschlänger. Beihelt «Technische Mechanik» zu Z. VDI, Bd. 69. S. 24–28.
6. Woschni G. Untersuchung des Warmeubergangung des Druckverlust in gekrümmten Röhren. Diss. Dresden, 1959.
7. Srinivasan P.S., Nandapurkar S.S., Holland F.A. Pressure drop and heat transfer in coils // Trans. Instn. Chem. Engrs. 1968. Vol. 218. P. 113–119.
8. Махди Я.Ю., Шматов Д.П., Дроздов И.Г., Бараков А.В. Моделирование конвективного теплообмена в криволинейных каналах с кольцевыми турбулизаторами // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. 2012. Т. 8, № 5. С. 88–91.
9. Калинин Э.К., Дрейцер Г.А., Ярхо С.А. Интенсификация теплообмена в каналах. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1990.
10. Мигай В.К. Моделирование теплообменного энергетического оборудования. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987. 264 с.
11. Антуфьев В.И. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева. М.: Энергия, 1966. 183 с.

Багаутдинова Альфия Гиззетдиновна, канд. техн. наук, доц.

E-mail: bagoutdinova@rambler.ru

Казанский (Приволжский) федеральный университет

Золотоносов Яков Давидович, д-р техн. наук, проф.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 23.12.16

Bagoutdinova Alfiya Gizzetdinovna, PhD, Ass. Professor

Kazan (Volga region) Federal University, Russia

Zolotonosov Yakov Davidovich, DSc, Professor

Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

CALCULATION AND EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF COIL HEAT EXCHANGERS TYPE «PIPE IN PIPE» WITH A VARYING BENDING RADIUS HELICAL SPIRAL

Offered range of coil heat exchangers type «pipe in pipe» with a varying bending radius helical spiral. The developed algorithm of calculation of such devices is implemented as a program in the programming language system of computer mathematics MATLAB. The numerical implementation of the defined heat and hydrodynamic characteristics of the apparatus and the efficiency of innovative heat transfer equipment.

К e y w o r d s: heat exchange, the coil, helical spiral.

REFERENCES

1. Dreitser G.A. Problemy sozdaniya kompaktnykh trubchatykh teploobmennykh apparatov [The problem of creating compact tubular heat exchangers]. Teploenergetika [Heat power industry]. 1995. No. 3. P. 11–18. (in Russian)
2. Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ya.D. Zmeevikovye teploobmenniki. Modelirovanie. Raschet [Coil heat exchangers. Modeling. Calculation]. Kazan, KGASU, 2016. 245 p. (in Russian)
3. Bazhan P.I., Kanevets G.E., Seliverstov V.M. Spravochnik po teploobmennym apparatam [Handbook of heat exchangers]. Moscow, Mashinostroenie, 1989. 367 p. (in Russian)
4. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimicheskoy tekhnologii: uchebnoe posobie dlya vuzov [Examples and problems at the rate of the processes and apparatuses of chemical technology. Textbook for universities]. Leningrad, Chemistry, 1987. 576 p. (in Russian)
5. Jeschke H. Wärmeübergang und Druckverlust in Rohrschlänger. Beihelt «Technische Mechanik» zu Z. VDI, Bd. 69. S. 24–28.
6. Woschni G. Untersuchung des Wärmeübergang des Druckverlust in gekrümmten Rohren. Diss. Dresden, 1959.
7. Srinivasan P.S., Nandapurkar S.S., Holland F.A. Pressure drop and heat transfer in coils. Trans. Instn. Chem. Engrs, 1968. Vol. 218. Pp. 113–119.
8. Makhdhi Ya.Yu., Shmatov D.P., Drozdov I.G., Barakov A.V. Modelirovanie konvektivnogo teploobmena v krivolineynikh kanalakh s kol'tsevymi turbulizatorami [Modeling of convective heat transfer in curvilinear channels with annular turbulators]. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of Voronezh State Technical University]. 2012. T. 8, No. 5. Pp. 88–91. (in Russian)
9. Kalinin E.K., Dreitser G.A., Yarkho S.A. Intensifikatsiya teploobmena v kanalakh [Intensification of heat transfer]. Moscow, Mashinostroenie, 1990. (in Russian)
10. Migay V.K. Modelirovanie teploobmennogo energeticheskogo oborudovaniya [Simulation of heat-exchange power equipment]. Leningrad, 1987. 264 p. (in Russian)
11. Antuf'ev V.I. Effektivnost' razlichnykh form konvektivnykh poverkhnostey nagreva [Efficiency of various forms of convective heating surfaces]. Moscow, Energy, 1966. 183 p. (in Russian)

УДК 697.922.26.001.24

А.М. ЗИГАНШИН, Е.Э. БЕЛЯЕВА, В.А. СОКОЛОВ

СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОФИЛИРОВАНИИ ОСТРОГО ОТВОДА И ОТВОДА С НИШЕЙ

По результатам численных исследований определены коэффициенты местного сопротивления (КМС) острого двухмерного отвода в широком диапазоне изменения ширины канала до и после него. Установлена зависимость КМС отвода с нишой от ее глубины. Для каждого исследованного случая найдены очертания вихревых зон. Показано, что вихревая зона у внутреннего угла не зависит от размеров и наличия ниши. Численно смоделированы усовершенствованные отводы, внутренний острый угол которых спрофилирован по ранее определенным очертаниям вихревых зон. Установлено, что сопротивление усовершенствованного отвода от 30 до 50 % ниже, чем острого.

Ключевые слова: острый отвод, численные расчеты, коэффициенты местного сопротивления, профилированный отвод, отвод с нишой, снижение сопротивления.

Для систем вентиляции и кондиционирования воздуха всегда являются существенными потери давления, связанные с местным сопротивлением, которое возникает в фасонных элементах воздуховодов этих систем – отводах, тройниках, конфузорах и других подобного рода возмущающих элементах (ВЭ). Причина потерь давления заключается в перестройке потока, происходящей в ВЭ, а также в образовании вихревых зон (ВЗ) при срыве потока с внутренних острых кромок. Вторую составляющую потерю давления можно снизить, если скруглять острые кромки [1], причем, чем больше радиус скругления, тем больше его эффект. Однако при этом существенно возрастают габариты фасонной детали, что в реальном строительстве часто недопустимо из-за экономии пространства, отводимого для прокладки инженерных коммуникаций. По этой причине на практике очень часто встречаются фасонные детали в виде прямых отводов, тройников и различного рода прямых врезок.

Предлагаемое в патенте [2] решение по установке специальных профилирующих вставок внутри прямой фасонной детали позволяет оставить ее габариты минимальными, и в то же время снизить коэффициент местного сопротивления. Очертания такой профилирующей вставки должны полностью повторять очертания свободной линии тока, разделяющей область основного течения в канале и ВЗ, образующейся в остром ВЭ. Вместе с тем исследований, где определяются очертания ВЗ в фасонных элементах воздуховодов, к настоящему времени выполнено далеко недостаточно. В работе [3], например, визуализирована ВЗ при отрыве от внутреннего угла острого отвода на 90° , но не определены ее очертания. В работе [4] проведен достаточно подробный эксперимент по определению полей скорости и давлений в двухмерном канале постоянного сечения с острым отводом на 90° . Очертание ВЗ у внутреннего угла установлено двумя способами – из условия

сохранения массы посредством интегрирования профиля скорости на участке с ВЗ и определения координаты, где расход равен расходу в канале до отвода, а также с использованием предположения о том, что скорость на свободной линии тока равна $6/10$ скорости в основном потоке, как это считается для «прямого» турбулентного слоя смешения. Результаты достаточно хорошо соответствуют друг другу, а также работе [5], где линия тока была вычислена с помощью теории течения идеальной жидкости методом конформных отображений. С использованием этого же метода в [6] определены очертания ВЗ для отводов с соотношением размеров b_0/b_1 , равных 0,1 и 1,0 (рис. 1). Из-за допущений в [6] свободная линия тока хорошо совпадает с экспериментом лишь в начале. Далее же вместо того, чтобы замкнуться на стенке отвода, линия уходит в бесконечность, простираясь вглубь параллельно стенке канала.

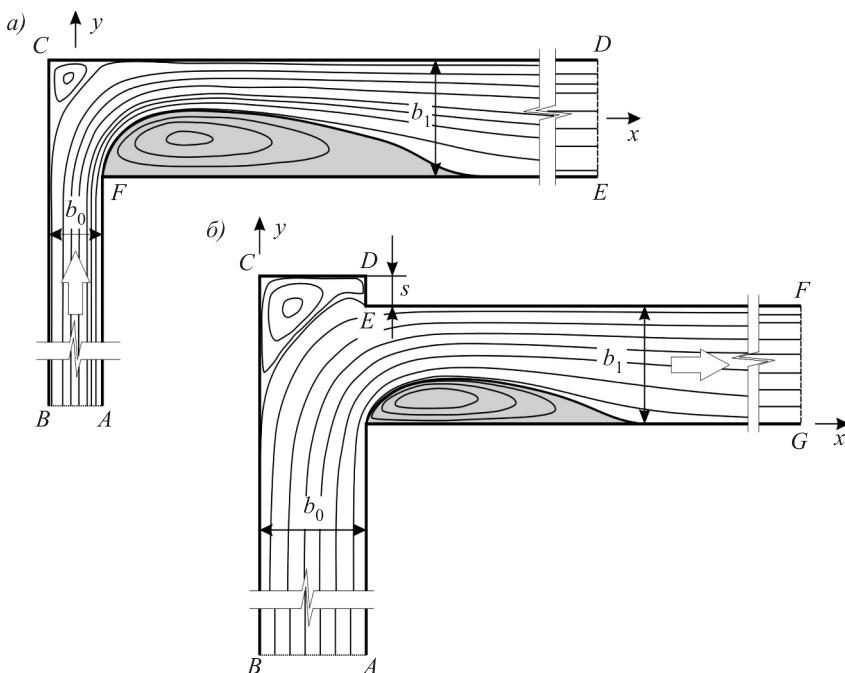


Рис. 1. Геометрия расчетной области и характерные линии тока в отводе (а) и отводе с нишней (б)

b_0, b_1 – ширина отвода до и после поворота потока

Исследование такого течения проводилось и численно. Ряд статей разных (в том числе последних) лет [7–10] посвящен изучению течений в каналах с различными типами отводов; целью при этом является определение коэффициентов местного сопротивления (КМС), и особое внимание уделяется проверке (верификации) получаемых результатов.

В данной работе численно решается задача о течении в отводе и отводе с нишней (см. рис. 1) при помощи пакета программ *Fluent* в двухмерной турбулентной постановке. Система уравнений движения Навье–Стокса, осредненных по Рейнольдсу, замыкается посредством моделей турбулентности.

Поскольку для рассматриваемой задачи важно правильно смоделировать течение вблизи твердой стенки, проверялись два разных подхода – с использованием «стандартных» пристеночных функций (*SWF*) и расширенного пристеночного моделирования (*EWT*) [11]. Для устранения «сеточной зависимости» на первом этапе численного расчета каждая задача решалась для ряда расчетных сеток с последовательным измельчением – сначала по всей области, а затем в области вблизи твердых стенок.

Течение в отводе. В качестве граничных условий (*ГУ*) задачи приняты: на участке *AB* – равномерное распределение скорости $v_y = 10 \text{ м/с}$, на участке *ED* – «свободная» граница (избыточное давление равно нулю), остальные границы непроницаемые (*ГУ «стенка»*).

Для установления необходимой степени измельчения расчетной сетки, а также выбора адекватного сочетания пристеночных моделей и моделей замыкания, решалась тестовая задача с отношением $b_1/b_0 = 2$ с использованием наиболее универсальной «стандартной» $k-\epsilon$ модели турбулентности (*KES*), и наиболее подробной модели Рейнольдсовых напряжений (*RSM*), в сочетаниях с пристеночным моделированием *SWF* и *EWT*. Исходная (первоначальная) расчетная сетка имела следующие параметры: размер минимальной ячейки 0,316 мм, общее количество ячеек в расчетной области 804 шт. После всех этапов измельчения размер минимальных ячеек составил $5,59 \cdot 10^{-2} \text{ мм}$, а общее количество ячеек достигло $3,463 \cdot 10^5$ шт.

По результатам решения каждой задачи находилось распределение полного давления по длине канала с отводом. Один из характерных результатов представлен на рис. 2. В начале канала ($-8 < y < -6,55$) можно видеть зону нелинейного падения давления, обусловленную заданием *ГУ* на входе в виде прямоугольного профиля скорости, и дальнейшей его деформацией в канонический.

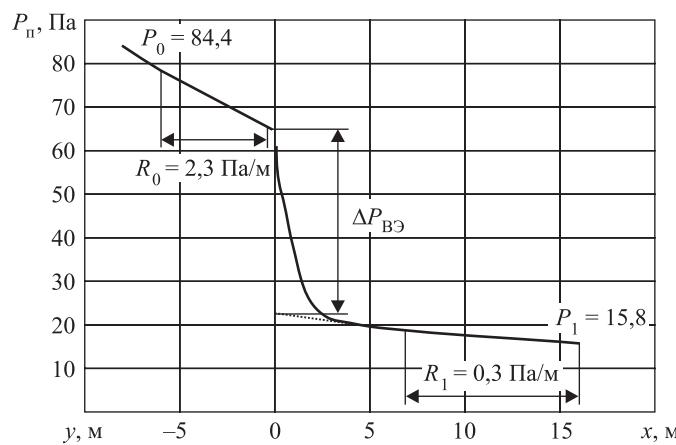


Рис. 2. Распределение полного давления по длине канала с отводом $b_1/b_0 = 2$ для сетки с наименьшим размером ячеек

Далее следует зона с практически линейным изменением давления ($-6,55 < y < -0,35$), что соответствует падению давления только за счет трения ($R_0 = 2,3 \text{ Па/м}$). На коротком участке до поворота ($-0,35 < y < 0$) и более протяженном ($0 < x < -6,9$) после него имеется зона влияния ВЭ с нелиней-

ным падением давления. Далее опять следует область линейного падения давления с $R_1 = 0,3$ Па/м ($-6,9 < x < -16,0$).

С использованием найденных численно величин давления в начале (P_0) и конце (P_1) канала, а также удельного падения давления R_0 и R_1 на соответствующих участках канала рассчитаны значения КМС для каждой задачи. Например, для случая, приведенного на рис. 2,

$$\zeta = \frac{P_0 - P_1 - R_0 \cdot l_0 - R_1 \cdot l_1}{\rho v^2 / 2} = \frac{84,8 - 15,8 - 2,3 \cdot 6,55 - 0,3 \cdot 16}{1,225 \cdot 10^2 / 2} = 0,718,$$

здесь l_0 и l_1 – длина канала до и после ВЭ соответственно.

На рис. 3 показано изменение значения КМС в зависимости от величин, характеризующих степень измельчения расчетной сетки (y^* или y^+), и от выбранного сочетания моделей. Из рис. 3 видно, что все сочетания моделей, кроме *RSM SWF*, удовлетворительно согласуются с известными данными [1]. При этом сочетание *KES EWT* приводит к наилучшим результатам при значениях $10 < y^+ < 1$, т.е. при очень мелкой сетке, а *KES SWF* – при значениях $20 < y^* < 40$, соответствующих более крупной сетке, что позволяет снизить время, затрачиваемое на вычисления. Поэтому задачи с другими соотношениями b_1/b_0 ($0,2; 0,6; 1; 3$) далее решались с сочетанием моделей *KES SWF*.

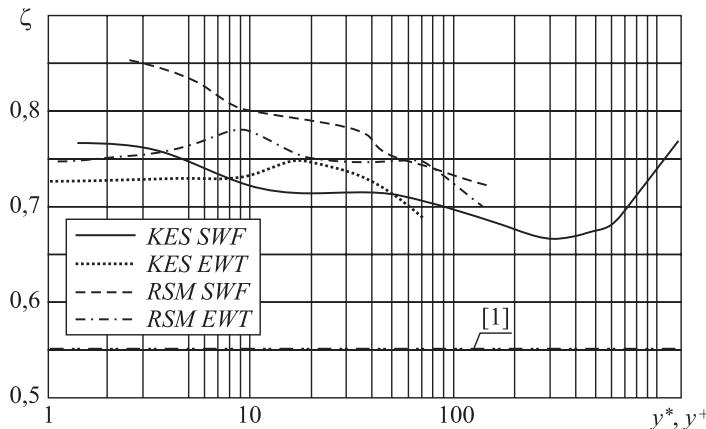


Рис. 3. Зависимость КМС от степени измельчения сетки (y^* , y^+), моделей турбулентности и пристеночных функций

В результате определены зависимость КМС от b_1/b_0 (рис. 4, а) и очертания вихревых зон (рис. 4, б). На рис. 4, б для сравнения нанесены данные из работы [1].

Видно, что значения, найденные численно, несколько завышены относительно [1], но находятся с ними в удовлетворительном согласии (отличие около 20 %). Полученные результаты позволяют расширить диапазон данных для расчета неравносторонних отводов. На рис. 4, б приведены очертания ВЗ, построенные по результатам численного расчета, а также взятые из работ [4, 5], для соотношения $b_1/b_0 = 1$. Все три линии до $\bar{x} \approx 1$ очень хорошо совпадают между собой. По результатам теоретического анализа [5] из-за особенностей аппарата конформных отображений и теории течения идеальной жидкости свободная линия тока становится параллельной стенке отвода

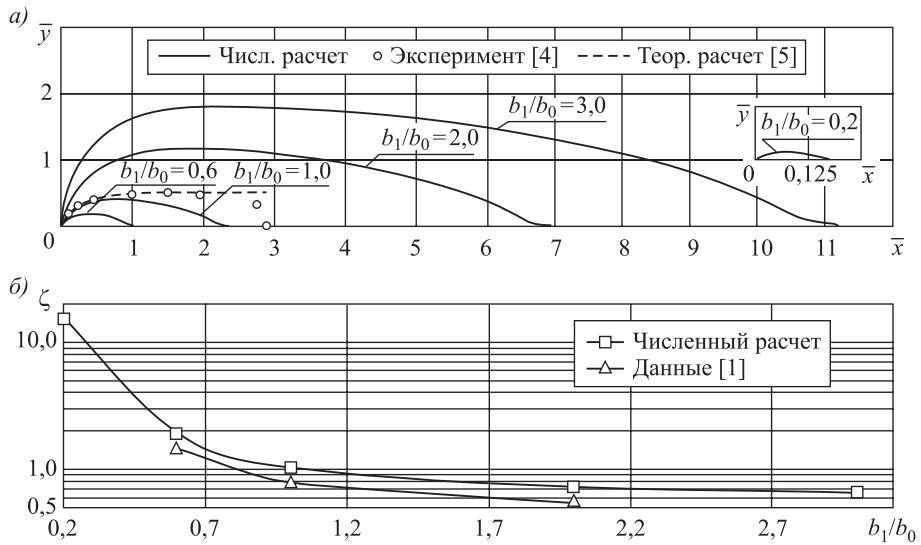


Рис. 4. Острый отвод

a – зависимость КМС от соотношения b_1/b_0 ; *б* – очертания ВЗ

и на ней не замыкается. Вихревая зона, найденная экспериментально [4], несколько больше (на 28 %) установленной численно, что позволяет считать сходимость результатов достаточно удовлетворительной.

Течение в отводе с нишой. При решении задачи о течении в отводе с нишей ширина канала принята постоянной ($b_0 = b_1 = b = 0,1$ м); изменялась глубина ниши s от 0 до 0,2 м или $0 < s/b < 2$. В [1] указано, что сопротивление такого отвода, вне зависимости от значения s , на 20 % выше чем у отвода без ниши.

Здесь граничные условия для сравнения с результатами в отводе без ниши приняты так, что отвод работает на вытяжку: входная граница **AG** – «свободная», а на выходной границе **DE** – условие равномерного распределения скорости $v_x = 10$ м/с (см. рис. 1, б).

Так же как и для случая без ниши, были проведены исследования наиболее адекватного сочетания моделей замыкания и пристеночных функций. Они показали аналогичные результаты, но поскольку размеры ниши в данном случае достаточно малы, то было выбрано сочетание *KES EWT*.

На рис. 5, *a* видна некоторая зависимость КМС от глубины ниши, но в исследованном диапазоне значений s отличие от рекомендаций [1] невелико, а погрешность при расчете не превышает 15 %, что приемлемо при инженерных расчетах. Также видно (рис. 5, *б*), что ВЗ, образующаяся при срыве потока с внутренней острой кромки, не зависит от глубины ниши и от ее наличия. Очертание ВЗ, образующейся во внешнем углу отвода и соответственно в самой нише, ожидаемо существенно зависит от s при ее малых значениях, а с увеличением s перестает от нее зависеть. Нужно отметить также, что сравнение результатов расчетов течения в вытяжном отводе (при $s = 0$) и приточном отводе без ниши не выявило никаких существенных отличий ни в значениях КМС, ни в очертаниях ВЗ.

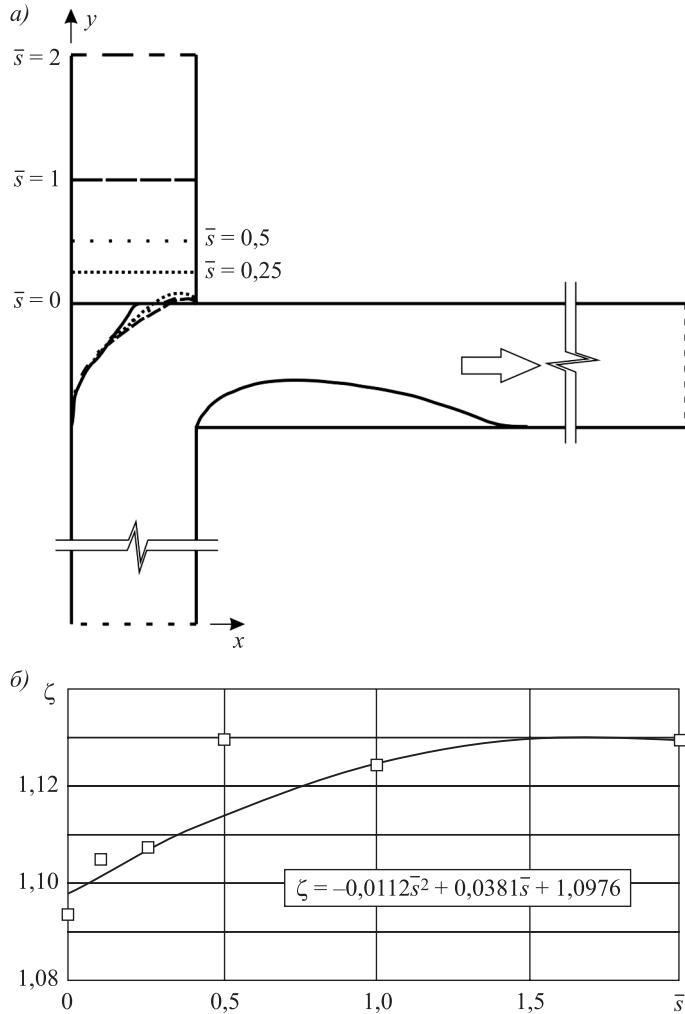


Рис. 5. Острый отвод с нишней: а – очертания ВЗ; б – зависимость КМС отвода с нишней от глубины ниши s

Профилирование отводов. Определенные выше очертания вихревой зоны, образующейся при срыве с внутренней кромки, использовались для исследований с целью создания компьютерных моделей профилированных отводов. Профилирование внешнего угла отвода также приводит к снижению КМС, но менее существенному, чем внутреннего [1, 12], и поэтому в дальнейших исследованиях не рассматривалось. Аналогично вышеописанному для каждой задачи проводилось устранение «сеточной зависимости» и по распределению полного давления определялось значение КМС. Итоговые результаты представлены на рис. 6 в виде графической зависимости $\zeta = \zeta(b_1/b_0)$.

Как следует из рис. 6, сопротивление профилированного отвода от 30 до 50 % ниже острого.

Выводы. Получена зависимость КМС для острого отвода в более широком диапазоне изменения его размеров и установлены очертания вихревой зоны во внутреннем углу отвода. Найдена зависимость КМС

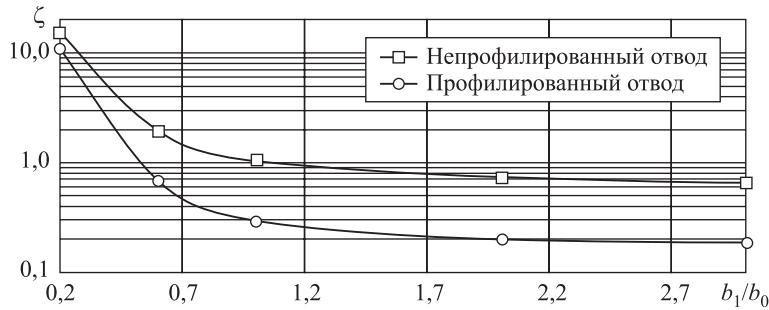


Рис. 6. Зависимость КМС от размеров профилированного отвода

отвода с нишой от ее глубины. Определены значения КМС для энергоэффективных отводов, профилированных путем установки вставок по очертаниям вихревых зон.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М.О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.
- Пат. 2604264 Рос. Федерация. МПК F16L 43/00, МПК F16L 25/14. Соединительный фасонный элемент с профилирующими вставками / А.М. Зиганишин, И.С. Алещенко, М.Г. Зиганишин и др.; заявитель и патентообладатель: Казанский гос. архитектурно-строит. ун-т. № 2014137755/06; заявл. 17.09.14; опубл. 10.12.16; Бюл. № 34. 13 с.
- Tunstall M.J., Harvey J.K. On the effect of a sharp bend in a fully developed turbulent pipe-flow // J. Fluid Mech. 1968. Vol. 34, No. 3. P. 595–608.
- Hesketh G. Two-dimensional miter-bend flow // J. Basic Eng. 1971. Vol. 93, No. 3. P. 433–443.
- Haase D. Strömung in einem 90°-Knie // Ingenieur-Archiv. 1954. Bd. 22, No. 4. S. 282–292.
- Lichtarowicz A., Markland E. Calculation of potential flow with separation in a right-angled elbow with unequal branches // J. Fluid Mech. 1963. Vol. 17, No. 4. P. 596–606.
- Liu W., Long Z., Chen Q. A procedure for predicting pressure loss coefficients of duct fittings using CFD (RP-1493) // HVAC&R Res. 2012. Vol. 18, No. 1997. P. 1168–1181.
- Munisamy K., Yusoff M. CFD analysis onto PU/PIR fitting in rectangular duct // ICEE 2009 3rd Int. Conf. Energy Environ. Malacca, Malaysia, 2009. P. 402–407.
- Röhrlig R., Jakirlić S., Tropea C. Comparative computational study of turbulent flow in a 90° pipe elbow // Int. J. Heat Fluid Flow. 2015. Vol. 55. P. 120–131.
- Yamashita H. et al. Fluid flow and heat transfer in a two-dimensional miter-bend: 1st report, experiments and analyses // Bull. JSME. 1986. Vol. 29, No. 258. P. 4164–4169.
- Ansys Fluent 6.3 Documentation / 12.11.1 Near-Wall Mesh Guidelines. URL: <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node518.htm#sec-guidelines-wf> (дата обращения: 03.12.2016).
- Зиганишин А.М. Снижение энергозатрат при движении потоков путем профилирования фасонных частей в коммуникациях энергоустановок // Надежность и безопасность энергетики. 2015. № 1. С. 63–68.

Зиганшин Арслан Маликович, канд. техн. наук, доц.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Беляева Евгения Эдуардовна, магистр

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Соколов Владимир Александрович, студ.

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 26.12.16

Ziganshin Arslan Malikovich, PhD, Ass. Professor

Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

Belyaeva Evgeniya Eduardovna, MSc

Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

Sokolov Vladimir Aleksandrovich, Student

Kazan State University of Architecture and Engineering, Russia

PRESSURE LOSSES REDUCTION WITH PROFILING OF SHARP ELBOW AND ELBOW WITH DEAD-END

Based on the results of numerical investigations determined the loss coefficients of sharp 2D elbow for a wide range of channel width before and after elbow. The dependence of the loss coefficients of elbows with dead-end on its depth is defined. For each test case defined contours of vortex zones. It is shown that the vortex zone at an internal corner does not depend on the size and the presence of the dead-end. Numerically simulated improved elbows, internal sharp corner of which is shaped by the previously determined contours. It is found that the resistance of improved elbows from 30 to 50 % lower than the sharp.

К e y w o r d s: sharp elbow, numerical calculations, loss coefficients, profiled elbow, elbow with dead-end, reduction of resistance.

REFERENCES

1. I del'chik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Handbook of hydraulic resistance] Ed. M.O. Shtejnberg. 3rd revised and enlarged ed. Moscow, Mashinostroenie, 1992. 672 p. (in Russian)
2. Patent 2604264 RF. Soedinitel'nyy fasonnyy element s profiliruyushchimi vstavkami [Shaped connecting element with profiling inserts]. A.M. Ziganshin, I.S. Aleshchenko, M.G. Ziganshin et. al. No. 2014137755/06; appl. 17.09.14; publ. 10.12.16; Bull. No. 34. 13 p. (in Russian)
3. Tunstall M.J., Harvey J.K. On the effect of a sharp bend in a fully developed turbulent pipe-flow // J. Fluid Mech. 1968. Vol. 34, No. 3. Pp. 595–608.
4. Hesketh G. Two-Dimensional Miter-Bend Flow // J. Basic Eng. 1971. Vol. 93, No. 3. P. 433–443.
5. Haase D. Strömung in einem 90°-Knie // Ingenieur-Archiv. 1954. Bd. 22. No. 4. S. 282–292.
6. Lichatowicz A., Markland E. Calculation of potential flow with separation in a right-angled elbow with unequal branches // J. Fluid Mech. 1963. Vol. 17, No. 4. Pp. 596–606.
7. Liu W., Long Z., Chen Q. A procedure for predicting pressure loss coefficients of duct fittings using CFD (RP-1493) // HVAC&R Res. 2012. Vol. 18, No. 1997. Pp. 1168–1181.
8. Munisamy K., Yusoff M. CFD analysis onto PU/PIR fitting in rectangular duct // ICEE 2009 3rd Int. Conf. Energy Environ. Malacca, Malaysia, 2009. Pp. 402–407.

9. Röhrlig R., Jakirlić S., Tropea C. Comparative computational study of turbulent flow in a 90° pipe elbow // Int. J. Heat Fluid Flow. 2015. Vol. 55. Pp. 120–131.
10. Yamashita H. et al. Fluid Flow and Heat Transfer in a Two-dimensional Miter-bend: 1st Report, Experiments and Analyses // Bull. JSME. 1986. Vol. 29, № 258. Pp. 4164–4169.
11. Ansys Fluent 6.3 Documentation / 12.11.1 Near-Wall Mesh Guidelines. Available at: <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node518.htm#sec-guidelines-wf>. (date of access: 03.12.16)
12. Ziganshin A.M. Snizhenie energozatrat pri dvizhenii potokov putem profilirovaniya fasonnykh chastey v kommunikatsiyakh energoustanovok [Reducing the energy consumption of flows by profiling fittings in communications of power plants]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki [Reliability and safety of energy]. 2015. No.1. Pp. 63–68. (in Russian)

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ, ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И РЕДАКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ РУКОПИСЕЙ СТАТЕЙ

1. Рукопись представляется в редакцию на *русском языке*. Зарубежные авторы могут присыпать 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.

Если статья была или будет направлена в другое издание, или же была ранее опубликована, необходимо обязательно сообщить об этом редакции.

2. Рукопись должна готовиться на компьютере в редакторе Microsoft Word для Windows (версии от Word 97 до Word 10; от Windows XP до Windows 10). Текст набирают шрифтом Times New Roman Сг размером 14 пт с межстрочным интервалом 1,5, все поля — 20 мм. Обязательна нумерация страниц внизу посередине. Объем рукописи — до 12 страниц А4, включая иллюстрации, таблицы, библиографический список и сведения об авторах.

3. Состав рукописи статьи, правила и образец оформления см. на Internet-сайте журнала <http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/>

a) русскоязычная часть:

- индекс УДК — в левом верхнем углу, прописными буквами;
- инициалы, фамилии авторов;
- название статьи;
- аннотация объемом до 1/3 страницы текста (не менее 80 слов);
- ключевые слова (не менее 5);
- текст статьи:
 - следует применять физические величины и их обозначения согласно международной системе СИ;
 - аббревиатуры и сокращения расшифровываются при первом использовании;
 - ф о р м у л ы набираются шрифтом Times New Roman в редакторе формул MS Equation или MathType, 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.) набираются прямым шрифтом; латинские буквы — курсивом;
 - во избежание смещения сходных изображений прописных и строчных букв *V* и *v*, *S* и *s*, *O* и *o*, *K* и др., а также трудноразличимых букв и символов *l*, *e* и *1* (цифра), *n* и *p*, *I* и *J* и т.п. пояснения выполняются простым карандашом на полях;
 - и л л ю с т р а ц и и представляются в редакцию в виде файлов, созданных в Corel Draw или Microsoft Word, записанных с разрешением 300 дпі, с расширением cdr (предпочтительно) или .doc, фотографии — TIFF или JPEG; надписи и цифры набирать шрифтом Times New Roman, 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);
 - иллюстрации распечатываются в двух экземплярах, с подписями к ним, размер иллюстрации — не более 20×30 см, их общее число, как правило, не более 4;
 - т а б л и ц ы печатаются каждая на отдельном листе, все наименования в них даются полностью, без сокращения слов;
 - б и б l o g r a f i c h e s k i y c p i s o k (не менее 8 ссылок) составляется 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, библиографический список следует оформлять по ГОСТ Р 7.0.5–2008 (примеры см. на сайте http://izvuzstr.sibstrin.ru/oformlen/rules_and_examples_of_design_bibliographies_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;
- с в е д е н i я о б а в т о р а х: последовательно для каждого — фамилия, имя, отчество (полностью), учченая степень, звания (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать), наименование учреждения, в котором работает автор, e-mail автора, страна (если не Российская Федерация);

б) англоязычная часть:

- 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/);

(Окончание правил)

- ученая степень (DSc — доктор наук, PhD — кандидат наук, MSc — магистр, без указания научного направления), ученые звания (Professor, Ass. Professor, Academician of..., Corr. 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);
 - библиографический список:
 - 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 — (in Russian).
4. Статья должна быть тщательно отредактирована и подписана всеми авторами (с указанием даты отправки статьи).
5. Рецензентов для статей редакция назначает по своему усмотрению; авторы могут сообщить редакции данные о специалистах по профилю статьи. Доработанную после рецензии статью присыпать в электронном виде.
6. Корректура статьи может предоставляться по запросу автора.
7. Гонорар за опубликование статьи не выплачивается.
8. Журнал публикует информацию о научно-технических разработках в области строительства объемом 1 с., включая 1–2 иллюстрации. Указываются разработчики: фамилия, имя, отчество полностью, звания и контактная информация. Электронная версия обязательна.
9. Рукописи, не принятые к опубликованию, авторам не высыпаются.

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 1-е полугодие по каталогу «Роспечать» 2017 г.

каталожная цена за 6 месяцев — 3900 р.

цена отдельного номера — 650 р.

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 1 (697) 2017

Научно-теоретический журнал

Редакторы: *С.М. Погудина, Н.И. Коновалова*
Технический редактор *Н.М. Макаренко*
Компьютерная верстка *Р.Г. Усова*
Корректор *Г.И. Шведкина*