

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

№ 2 (698)
Февраль 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 27.02.17. Формат 70×108 1/16
Усл. печ. л. 10,15+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 4172

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

© Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2017

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

- Ставницеर Л.Р., Буслов А.С., Бахолдин Б.В., Айзенберг Я.М. Устойчивость траншей при устройстве «стены в грунте» с учетом вибрации 5
Цветков Н.А., Хуторной А.Н., Толстых А.В., Колесникова А.В. Физико-математическая модель тепловлагопереноса в ограждающих конструкциях из профилированного теплового бруса 12

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

- Немировский Ю.В. Продельное состояние балок на упругом основании 21

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

- Калугин Ю.Б., Тупицын Р.Ю. Выбор работ для «сжатия» критического пути календарного графика 29

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

- Шиляев М.И., Хромова Е.М., Дорошкина А.А. Расчет многоступенчатой

инерционно-конденсационно-абсорбционной пыле- и газоочистки промышленных выбросов в атмосферу	
Часть 2. Конденсационно-абсорбционная модель процесса тепломассообмена и комплексной пылегазоочистки в форсуночных аппаратах	39
Солопанов Е.Ю., Кульков В.Н., Кудрявцева Е.В., Широков А.Е. Математическая модель и статистическая обработка данных воздушной регенерации иммобилизованного ила в аэротенке	52
Гальперин Е.М. Условия функционирования и надежность кольцевой водопроводной сети: заблуждения и реальность	60
СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ	
Семикопенко И.А., Воронов В.П., Юрченко А.С. Расчет мощности классифицирующего устройства дезинтегратора	69
Тюменцев Е.Ю., Гаврильчик Г.Р., Малышев М.С., Кварцхалая Т.Р., Гвоздев В.А., Абраменков Э.А. Дроссельный пневмоударный механизм с частичным вытеснением воздуха из камеры рабочего хода посредством трубы и стержня с внутренним каналом	78
НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ	
Амирханян М.З., Брюхань Ф.Ф., Кучмин А.В. Натурные измерения электромагнитных полей с частотой 50 Гц в составе инженерно-экологических изысканий	85
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Аркаев М.А., Жаданов В.И. Расчет односрезных соединений на витых крестообразных нагелях при усилении деревянных конструкций путем увеличения поперечного сечения	92
Кошелева О.Э., Паули И.А., Николаев Н.Ю. Изучение термодеструкции древесины после обработки химическими реагентами	101
Хахалев П.А., Воробьев Н.Д., Богданов В.С. Исследование малоподвижного ядра мелющей загрузки в шаровой барабанной мельнице	109

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. 2 (698)
February 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

- Stavnitser L.R., Buslov A.S.,
Bakholdin B.V., Aizenberg Ya.M. Stability of
trenches taking into account
vibration during «diaphragm wall» placing 5
Tsvetkov N.A., Khutoronoy A.N., Tolstykh A.V.
A physico-mathematical
model of heat and moisture
transfer in building envelopes
shaped heat timber 12

THE THEORY OF ENGINEERING STRUCTURES

- Nemirovskiy Yu.V. Limit
states beams on elastic fo-
undation 21

ECONOMICS AND MANAGEMENT OF CONSTRUCTION. AUTOMATION AND CONSTRUCTION TECHNOLOGY

- Kalugin Yu. B., Tupitsyn R.Yu. Choice of activi-
ties for crashing the critical
path of the network sche-
dule 29

SANITARY ENGINEERING

- Shilyaev M.I., Kromo-
va E.M., Doroshkina A.A.
Calculation of multi-stage
inertial-condensation-ab-

sorption of dust and gas purification of industrial emissions into the atmosphere Part 2. Condensation-absorption model of heat and mass transfer and integrated gas treatment devices in the nozzle	39
Solopanov E.Yu., Kul'kov V.N., Kudryavtseva E.V., Shirokov A.E. Mathematical model and statistical data processing of immobilized sludge air regeneration in the aeration tank	52
Gal'perin E.M. Operating conditions and reliability ring water distribution network: misconceptions and reality	60
BUILDING AND ROAD MACHINES	
Semikopenko I.A., Voronov V.P., Yurchenko A.S. Calculation of power devices classifies disintegrator	69
Tyumentsev E.Yu., Gavril'chik G.R., Malyshev M.S., Kvartskhalaya T.R., Gvozdev V.A., Abramenchik E.A. Throttle pneumoshock mechanism with partial displacement of air from the chamber of the stroke through the tube and the rod with the internal channel	78
SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE AND ECOLOGY	
Amirkhanyan M.Z., Bryukhan' F.F., Kuchmin A.V. Field measurements of electromagnetic fields with the frequency of 50 Hz in the framework of engineering and environmental surveys	85
SCIENTIFIC AND METHODICAL SECTION	
Arkaev M.A., Zhadanov V.I. Calculation of single-shear joints on twisted cruciform dowels while strengthening wooden designs by increasing cross section	92
Kosheleva O.E., Pauli I.A., Nikolaev N.Yu. Study of the thermal destruction of wood after working by the chemical reagents	101
Khakhalev P.A., Vorob'ev N.D., Bogdanov V.S. Research of sedentary core of grinding loading in ball mill	109

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ



УДК 624.131.537

Л.Р. СТАВНИЦЕР, А.С. БУСЛОВ, Б.В. БАХОЛДИН, Я.М. АЙЗЕНБЕРГ

УСТОЙЧИВОСТЬ ТРАНШЕЙ ПРИ УСТРОЙСТВЕ «СТЕНЫ В ГРУНТЕ» С УЧЕТОМ ВИБРАЦИИ

Решается задача расчета устойчивости стенок траншеи, заполненной тиксотропным раствором. В рамках разрабатываемого решения учитываются вибрационные воздействия, что актуально при производстве работ в зоне действия метро или при наличии других динамических воздействий. Схема потери устойчивости стенок траншеи предусматривает отрыв вертикальной параболической поверхности тела обрушения от остального массива грунта. Получено и решено трансцендентное уравнение. Показаны пути дальнейшей оптимизации решения при преобладании вибраций вертикального направления для уменьшения необоснованных запасов.

Ключевые слова: траншея, «стена в грунте», вибрация, бентонитовый раствор.

При устройстве «стены в грунте» устойчивость стенок траншеи обеспечивается путем замещения извлекаемого грунта бентонитовым раствором. Разработка грунта ведется плоским грейфером или гидрофрезами. Панель «стены в грунте», бетонируемая за один раз, состоит обычно из 1–3 заходок. При большой длине разрабатываемой панели возникает риск потери устойчивости стенок траншеи, который особенно велик при производстве работ в слабых грунтах. Свод правил 22.13330 требует выполнения расчета устойчивости стенок траншеи при ее разработке, где указывается, что при проектировании оснований ограждений, устраиваемых способом «стена в грунте», следует выполнять расчет устойчивости стенок траншеи, заполненной тиксотропным раствором. Таким образом, получение замкнутого решения такой задачи является важным и актуальным.

В своих дальнейших выкладках мы будем опираться на работу [1]. Примем возможную геометрическую форму тела обрушения грунта в траншее и ее стенок [2, 3] в виде параболического цилиндра с вертикальными образующими, горизонтальным сечением которого в верхней части является параболический сегмент с основанием, совпадающим со стенкой траншеи длиною l (рис. 1). Снизу этот цилиндр ограничен наклонной плоскостью, составляющей угол α с горизонтом и восходящей от дна траншеи на глубине h .

В книге Ж. Косте и Г. Санглера [4] показано, что такая форма тела обрушения близка к действительной; она характеризуется геометрическими

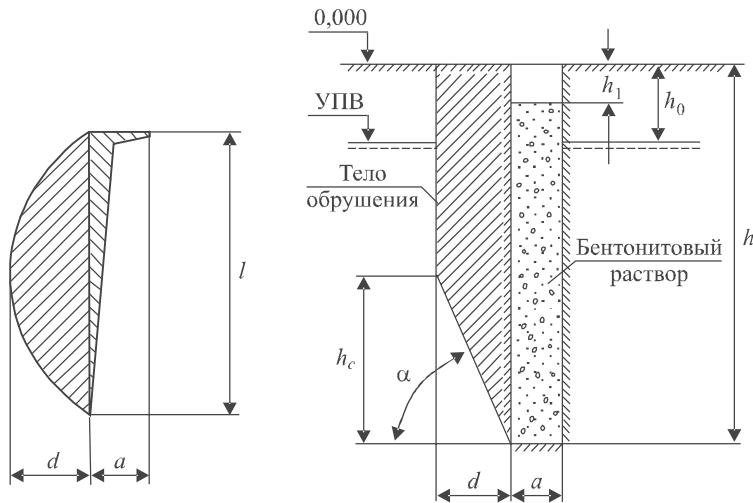


Рис. 1. Расчетная схема для проведения расчетов устойчивости стенок траншеи, заполненной тиксотропным раствором

параметрами, представленными на рис. 1. Два из этих параметров, определяющие длину и глубину h траншеи, заданы, третий – d , характеризующий образование арочного эффекта в грунте с углом внутреннего трения ϕ , определяется выражением

$$d = \frac{l}{2\tan\phi}. \quad (1)$$

Выражение (1) следует из условия предельного равновесия для параболической арки [5–7]. Четвертый параметр α предстоит найти из условий максимума равнодействующей F активного давления грунта в процессе решения задачи о предельном состоянии массива при обрушении стенки

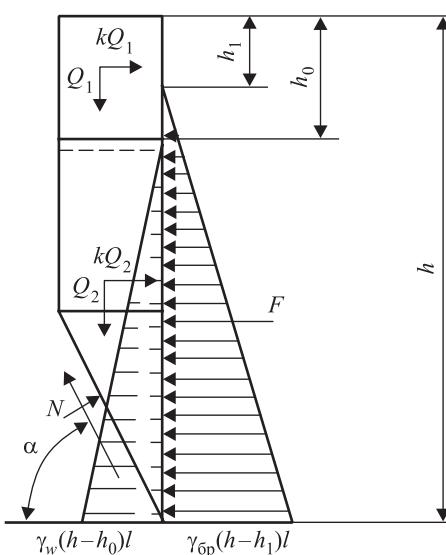


Рис. 2. Схема сил, действующих на тело обрушения в предельном состоянии

траншеи от статических нагрузок (собственный вес, гидростатическое давление) и динамических воздействий: метро, наземного транспорта, промышленных источников вибрации или сейсмических воздействий [8–10].

Схема сил, действующих на тело обрушения в предельном состоянии, показана на рис. 2. Приравнивая нулью сумму их проекций на вертикальное и горизонтальное направления, получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} G_1 + G_2 - N \cos\alpha - T \sin\alpha = 0, \\ k(G_1 + G_2) + N \sin\alpha - T \cos\alpha - F = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где G_1 – вес части грунта, расположенной в пределах тела обрушения выше уровня подземных вод;

G_2 – вес части грунта, расположенной в пределах тела обрушения ниже уровня подземных вод и определяемый с учетом взвешивающего действия воды; N, T – соответственно нормальная и касательная составляющие равнодействующей сопротивления грунта сдвигу по наклонной поверхности, ограничивающей тело обрушения снизу;

$k = a_y/g$ – коэффициент динамичности, представляющий собой отношение амплитуды ускорения колебаний грунта a_y к ускорению силы тяжести g ; F – равнодействующая сила активного давления грунта (тела обрушения) на бентонитовый раствор в траншее, определяемая без учета гидростатического давления подземных вод.

Ускорения колебаний грунта могут иметь любое направление в пространстве, однако наименее благоприятное для устойчивости вертикальных траншей направление мало отличается от горизонтального, поэтому в системе уравнений (2) динамические силы инерции движения грунта приняты направленными горизонтально в сторону траншеи.

Схема потери устойчивости стенки траншеи предусматривает полный отрыв вертикальной параболической поверхности тела обрушения от остального массива грунта, поэтому по этой поверхности в предельном состоянии не предусматривается действие никаких сил, гидростатические давления самоуравновешены, а по наклонной плоскости, ограничивающей снизу тело обрушения, имеющее площадь S , снизу вверх действует сила трения, выражение которой по Кулону замыкает систему уравнений (2):

$$T = cS + N \operatorname{tg} \varphi, \quad (3)$$

где c и φ – удельное сцепление и угол внутреннего трения грунта соответственно.

Учитывая, что для площади S можно из геометрических соотношений получить выражение

$$S = \frac{2}{3} \cdot \frac{dl}{\cos \alpha}, \quad (4)$$

представим уравнение (3) с использованием соотношения (1) в следующем виде:

$$T = \frac{cl^2}{3 \operatorname{tg} \varphi \cos \alpha} + N \operatorname{tg} \varphi. \quad (5)$$

Первое из уравнений (2) с учетом (5) дает соотношение

$$N = \frac{Q_1 + Q_2 - cl^2 \operatorname{tg} \alpha / 3 \operatorname{tg} \varphi}{\cos \alpha + \operatorname{tg} \varphi \sin \alpha}, \quad (6)$$

которое после подстановки во второе из уравнений (2) приводит к результату:

$$F = k(Q_1 + Q_2) - \frac{cl^2}{3 \operatorname{tg} \varphi} + \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) \left(Q_1 + Q_2 - \frac{cl^2}{3 \operatorname{tg} \varphi} \right). \quad (7)$$

Вес грунта в объеме тела обрушения (см. рис. 1) определяется по частям, имеющим объемы V_1, V_2 и V_3 :

$$Q_1 = \gamma V_1, \quad Q_2 = \gamma' (V_2 + V_3), \quad (8)$$

где γ и γ' – удельный вес грунта, расположенного выше и ниже уровня подземных вод (с учетом их взвешивающего действия воды):

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{2}{3}dlh_0, \\ V_2 &= \frac{2}{3}dl(h - h_0 - dtg\alpha), \\ V_3 &= \frac{2}{5}d^2l\operatorname{tg}\alpha. \end{aligned} \quad (9)$$

После геометрических преобразований с учетом соотношения (1) из выражения (7) получаем формулу равнодействующей активного давления на бентонитовый раствор в траншее

$$F = l^3 \frac{\operatorname{tg}(\alpha - \varphi) + k}{3\operatorname{tg}\varphi} \left[\frac{h_0}{l} \gamma + \left(\frac{h - h_0}{l} - \frac{\operatorname{tg}\alpha}{5\operatorname{tg}\varphi} \right) \gamma' \right] - \frac{cl^2}{3\operatorname{tg}\varphi} [1 + \operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{ctg}(\alpha - \varphi)]. \quad (10)$$

Для определения максимума функции $F(\alpha)$ можно использовать условие $dF/d\alpha = 0$, однако оно приводит к трансцендентному уравнению относительно искомого значения, которое решается численно методом последовательных приближений. Представляется более целесообразным сразу численно определять максимум активного давления, совершая операции метода последовательных приближений при вариациях параметра α до достижения экстремума функции $F(\alpha)$ с достаточной для практических расчетов точностью.

Коэффициент общей устойчивости траншеи k_y на рассматриваемой глубине определим из соотношения удерживающих и опрокидывающих сил:

$$k_y = \frac{F_{\text{бр}}}{2F + F_{\text{в}}}, \quad (11)$$

где $F_{\text{бр}}$ – равнодействующая сила давления бентонитового раствора на стенку траншеи;

$F_{\text{в}}$ – равнодействующая сила гидростатического давления воды со стороны грунтового массива.

Равнодействующая сила давления бентонитового раствора $F_{\text{бр}}$ удалена от нижней точки тела обрушения грунта на треть глубины залегания этой точки, а равнодействующая сила давления грунта не может находиться выше двух третей этой глубины, поэтому соотношение моментов этих сил скорректировано в запас прочности удвоением величины F в формуле (10). С учетом линейного закона гидростатического распределения по глубине давлений бентонитового раствора, где $\gamma_{\text{бр}}$ и γ_w соответственно удельный вес бентонитового раствора и воды, после подстановки этих выражений в формулу (11) получаем

$$k_y = \frac{\gamma_{\text{бр}} \cdot (h - h_1)^2}{\frac{4F}{l} + \gamma_w (h - h_0)^2}. \quad (12)$$

Если выполняется условие $k_y > 1,1$, рассматриваемый участок траншеи глубиной h и длиной l считается устойчивым. Минимальное значение коэффициента общей устойчивости траншеи принимается равным 1,1, если нет иных дополнительных требований.

Результаты работы могут быть использованы и с учетом вертикальной компоненты ускорения колебаний грунта a_z . Для этого во всех вышеприведенных формулах следует заменить ускорение силы тяжести g на $g + a_z$. При преобладании вибраций вертикального направления это может уменьшить необоснованный запас.

Выводы. При строительстве зданий и сооружений в городских условиях вблизи источников вибрации возрастает опасность возникновения аварийных ситуаций. Проблема может усугубляться в том случае, когда уровень подземных вод достаточно высок, а грунты могут менять свои прочностные показатели. Если «стена в грунте» устраивается вблизи существующего здания, возникает риск мгновенного обрушения его конструкций. Для исключения подобных проектных сценариев необходимо иметь замкнутое инженерное решение, позволяющее проводить расчеты с учетом всего многообразия влияющих факторов. Для таких задач получение численного решения не всегда оказывается эффективным.

Предложенный выше подход позволяет дать достаточно качественную оценку ситуации. К достоинствам подхода следует отнести возможность быстрой оценки ситуации на строительной площадке, что поможет найти баланс между скоростью производства работ и безопасностью при ведении работ в зонах нахождения источников вибрации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ставницеर Л.Р. Сейсмостойкость оснований и фундаментов. М.: Изд-во ассоциации строительных вузов, 2010. 448 с.
2. Piaskowski A., Kowalewski Z. Application of tixotropic clay suspensions for stability of vertical sides of deep trenches without strutting // 6th Int. Conf. SMFE. Montreal, 1965. Vol. III. Pp. 526–529.
3. Piaskowski A., Kowalewski Z. Thixotropic Properties of Suspensions of Soils with Different Grain Sizes and of Various Mineralogical Types // 5th ICSMFE. Paris, 1961. Vol. 1. Pp. 193–296.
4. Косте Ж., Сангла Г. Механика грунтов. Практический курс. М.: Стройиздат, 1981. 455 с.
5. Nash J.K.T.L., Jones G.K. The support of trenches using fluid mud // Proc. Symp. Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice. London: Butterworth, 1963. Pp. 177–180.
6. Schneebeli G. La Stabilite des tranches profondes forees en presence de bane // La Houille Blanche, 1964, 7. Pp. 815–822.
7. Li Y.C., Pan Q., Chen Y.M. Stability of slurry trenches with inclined ground surface // Journal of Geotechnical and Environmental Engineering. 2013, 139(9). Pp. 1617–1619.
8. Li A.J., Merifield R.S., Lin H.D., Lyamin A.V. Trench stability under bentonite pressure in purely cohesive clay // International Journal of Geomechanics, 2014, 14(1). Pp. 151–157.
9. Grandas-Tavera C.E., Triantafyllidis T. Simulation of a corner slurry trench failure in clay// Computers and Geotechnics. 2012, 45. Pp. 107–117.

10. Stuedlein A.W., Kramer S.L., Arduino P., Holtz R.D. Reliability of spread footing performance in desiccated clay // ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2012, 138(11). Pp. 1314–1325.

Ставницев Леонид Рувимович, д-р техн. наук, проф., начальник экспертизно-аналитического отдела НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «Научно-исследовательский центр “Строительство”»

Буслов Анатолий Семенович, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник лаборатории оснований и фундаментов на слабых грунтах НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «Научно-исследовательский центр “Строительство”»

Бахолдин Борис Васильевич, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник лаборатории свайных фундаментов НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «Научно-исследовательский центр “Строительство”»

Айзенберг Яков Моисеевич, д-р техн. наук, проф., заместитель руководителя Центра исследований сейсмостойкости сооружений НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «Научно-исследовательский центр “Строительство”»

Получено после доработки 18.01.17

Stavnitser Leonid Ruvimovich, DSc, Professor, head of the expert-analytical department at the Research Institute of bases and underground structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov «Joint Stock Company-Research Center of Construction», Russia

Buslov Anatoliy Semenovich, DSc, Professor, chief researcher of the laboratory of bases and foundations on soft ground at the Research Institute of bases and underground structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov «Joint Stock Company-Research Center of Construction», Russia

Bakhodlin Boris Vasil'evich, DSc, Professor, chief researcher of the laboratory of pile foundations at the Research Institute of bases and underground structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov «Joint Stock Company-Research Center of Construction», Russia

Ayzenberg Yakov Moiseevich, DSc, Professor, deputy head of the research center for seismic stability of constructions at the Research Institute of bases and underground structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov «Joint Stock Company-Research Center of Construction», Russia

STABILITY OF TRENCHES TAKING INTO ACCOUNT VIBRATION DURING «DIAPHRAGM WALL» PLACING

The extracted soil, that replacing by bentonite slurry may ensure the trench wall stability when the «diaphragm wall» is placing. The development of soil is doing by flat clamshells or hydromills. At once concreted «diaphragm wall» is usually consists of 1–3 sets. When the developed panel has a great length there is a risk of the trench walls stability loss and especially this risk high when works are doing in the soft grounds. Set of rules requires the calculation of the trench wall stability during its development, which states that the design of fences bases that arranged in a way of «diaphragm wall» should be done the calculation of the trench walls stability, filled thixotropic solution. This problem is solved within the framework of this article. Also the impact of vibration takes into account, which is important in the works that are doing in metro area or there is the presence of other dynamic effects.

К e y w o r d s: trench, «diaphragm wall», vibration, bentonite solution.

REFERENCES

1. Stavnitser L.R. Seysmostoykost' osnovaniy i fundamentov [Seismic stability of the bases and foundations]. Moscow, Izdatel'stvo assotsiatsii stroitel'nykh vuzov, 2010. 448 p. (in Russian).

2. Piaskowski A., Kowalewski Z. Application of tixotropic clay suspensions for stability of vertical sides of deep trenches without strutting. 6th Int. Conf. SMFE. Montreal, 1965. Vol. III. Pp. 526–529.
 3. Piaskowski A., Kowalewski Z. Thixotropic Properties of Suspensions of Soils with Different Grain Sizes and of Various Mineralogical Types. 5th ICSMFE. Paris, 1961. Vol. 1. Pp. 193–296.
 4. Koste Zh., Sanglera G. Mekhanika gruntov. Prakticheskiy kurs [Soil Mechanics. Practical course]. Moscow, Stroyizdat, 1981. 455 p. (in Russian).
 5. Nash J.K.T.L., Jones G.K. The support of trenches using fluid mud. Proc. Symp. Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice. London, Butterworth, 1963. Pp. 177–180.
 6. Schneebeli G. La Stabilite des tranches profondes forees en presence de bone. La Houille Blanche, 1964, 7. Pp. 815–822.
 7. Li Y.C., Pan Q., Chen Y.M. Stability of slurry trenches with inclined ground surface. Journal of Geotechnical and Environmental Engineering. 2013, 139(9). Pp. 1617–1619.
 8. Li A.J., Merifield R.S., Lin H.D., Lyamin A.V. Trench stability under bentonite pressure in purely cohesive clay. International Journal of Geomechanics, 2014, 14(1). Pp. 151–157.
 9. Grandas-Taveras C.E., Triantafyllidis T. Simulation of a corner slurry trench failure in clay. Computers and Geotechnics. 2012, 45. Pp. 107–117.
 10. Stuedlein A.W., Kramer S.L., Arduino P., Holtz R.D. Reliability of spread footing performance in desiccated clay. ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2012, 138(11). Pp. 1314–1325.
-

УДК 69.022 : 691.11 : 536.21

Н.А. ЦВЕТКОВ, А.Н. ХУТОРНОЙ, А.В. ТОЛСТЫХ, А.В. КОЛЕСНИКОВА

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА В ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ
ИЗ ПРОФИЛИРОВАННОГО ТЕПЛОВОГО БРУСА***

Актуальность работы обусловлена необходимостью определения тепло- и влагозащитных характеристик перспективных энергосберегающих ограждающих конструкций, выполненных из утепленного бруса повышенной прочности с поперечным креплением ламелей. Целью работы является краткий обзор проблем, возникающих при математическом моделировании процессов тепловлагопереноса в сложных конструкциях из элементами из дерева, и обсуждение методики разработки соответствующих физико-математических моделей.

Сформулирована физико-математическая модель, описывающая нестационарный трехмерный перенос тепла и влаги в ограждающих конструкциях зданий из профилированного теплового бруса с коннекторами и внутренней продольной ламелью. В модели учтены имеющиеся экспериментальные данные по изотермам сорбции влаги в древесине, а также зависимость коэффициентов влагопроводности и теплопроводности от температуры и влажности, что позволяет более полно отразить особенности исследуемого процесса.

Представленная физико-математическая модель предназначена для исследования тепловлажностных процессов в конструкциях из деревянного клееного профилированного бруса с целью повышения их эксплуатационных свойств.

Ключевые слова: профилированный тепловой брус, физико-математическая модель, тепловлагоперенос, влагопроводность, паропроводность, теплопроводность, сорбция влаги.

Большинство исследований процессов тепло- и влагопереноса в ограждающих конструкциях зданий, например [1–4], содержат в своей основе принципы и положения, обоснованные в [5, 6]. Основные отличия в моделировании процессов переноса связаны с учетом дополнительных физических факторов [1], осложняющих этот процесс, или со способами использования экспериментальных данных для замыкания моделей [2]. В [3] при использовании потенциала влагопереноса [4] разработана оптимальная одномерная модель тепло- и влагопереноса в наружных деревянных ограждающих конструкциях, позволяющая использовать весь массив экспериментальных данных по изотермам сорбции влаги. Основные допущения модели [3], хорошо зарекомендовавшие себя при расчетах тепловлажностного режима наружных ограждений, положены в основу предлагаемой пространственной трехмерной модели тепловлагопереноса в наружных стенах зданий, выполненных из утепленного клееного бруса повышенной прочности [7] с вертикальным креплением ламелей коннекторами из фанеры.

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований грант № 16-48-700367.

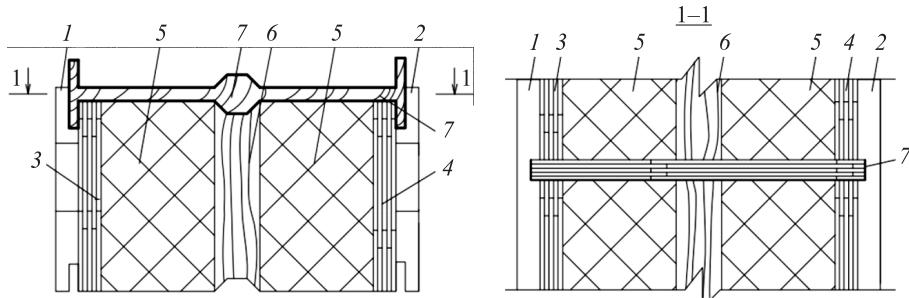


Рис. 1. Конструкция стен из утепленного kleеного бруса повышенной прочности с вертикальными коннекторами

1, 2 – профилированные продольные ламели; 3, 4 – слои фанеры; 5 – слои утеплителя; 6 – внутренняя продольная ламель; 7 – коннектор

Утепленный брус (рис. 1) состоит из наружных профилированных продольных ламелей, слоев фанеры, склеенных высокопрочным влагонепроницаемым kleem с ламелями, слоя утеплителя между ними и внутренней продольной ламели.

Поток влаги j , проходящей через деревянные части брусовской стены, можно определить через градиенты абсолютного потенциала влагопереноса θ_A и температуры T , как это сделано в [3, 4]:

$$j = -\rho_0 k (\nabla w_d + k_t \nabla T), \quad (1)$$

где ρ_0 – плотность сухой древесины, кг/м³;

w_d – влагосодержание древесины, в долях единицы, кг/кг;

$k = \lambda_A (\partial \theta_A / \partial w)$ – коэффициент влагопроводности древесины;

$k_t = \lambda_A [(\partial \theta_A / \partial T)_w + \delta_A]$ – термоградиентный коэффициент, учитывающий зависимость потенциала от температуры;

λ_A – коэффициент влагопроводности, м²/с;

δ_A – термоградиентный коэффициент, отнесенный к разности потенциалов влагопереноса, 1/К.

Коэффициенты k и k_t в формуле (1) определяются из эмпирических соотношений, представленных в [3].

Используя потенциал (1) с учетом данных [3, 4, 8], можно смоделировать нестационарный влагоперенос в деревянных ламелях (рис. 1), образующих внутреннюю и наружную поверхность исследуемого ограждения, и во внутренней продольной ламели с помощью уравнения

$$\frac{\partial w_{l,i}}{\partial \tau} = \operatorname{div}[k(\operatorname{grad} w_{l,i} + k_t \operatorname{grad} t_{l,i})], \quad (2)$$

где $t_{l,i}$ – температура в ламелях, °C;

τ – время, ч;

$w_{l,i}$ – влагосодержание древесины ламелей, в долях единицы, кг/кг.

В уравнении (2): $i = 1, 2, 3$. Индексы 1 и 2 относятся к профилированным продольным ламелям, индекс 3 – к внутренней продольной ламели.

Фанера, из которой выполнены коннекторы и слои между утеплителем и ламелями (рис. 1), относится к древесным материалам, но ее характеристики

ки существенно отличаются от свойств склеенных между собой и спрессованных под давлением и температурой слоев древесины. Связующее для всех видов фанеры содержит плохо растворимые клеевые составы, которые прекрасно противодействуют распространению влаги и выступают своего рода защитным слоем. Разные марки фанеры обладают разными свойствами по степени устойчивости к влаге. В конструкциях утепленного теплового бруса предполагается использовать влагостойкую фанеру, например, ФК или ФСФ. Эти виды фанеры практически не пропускают влагу и обладают весьма слабой способностью к пропусканию пара, их паропроницаемость составляет $0,014\text{--}0,02 \text{ мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$. В этом случае для описания процессов влагопереноса следует использовать модель, которая содержит уравнение переноса водяного пара и уравнение распространения влаги в виде жидкости. Такая модель предложена К.Ф. Фокиным в [6]. Согласно [6], пористый строительный материал при увлажнении последовательно проходит определенные стадии и достигает равновесного состояния с влажным окружающим воздухом.

Вода в коннекторах и слоях, склеенных с деревянными ламелями утепленного бруса (рис. 1), может находиться в паровой фазе или в виде жидкости, заполняющей внутрипоровое пространство, а также в связанном состоянии, когда она абсорбирована древесиной, из которой изготовлена фанера. Если относительная влажность воздуха $\phi < 1$ (сорбционная зона), то вода перемещается только в виде пара и ее распределение можно найти, решая уравнение диффузии водяного пара

$$\frac{\partial p_{\phi}}{\partial \tau} = \frac{p_*}{\xi_{\phi} \rho_{\phi}} \mu_{\phi} \nabla^2 p_{\phi}, \quad (3)$$

где p_{ϕ} – парциальное давление водяного пара в макрокапиллярах древесины, из которой изготовлена фанера, Па;

$p_* = p_*(t_{\phi})$ – давление насыщенного пара над поверхностью воды при соответствующей температуре, Па;

t_{ϕ} – температура в элементах бруса, выполненных из фанеры, $^{\circ}\text{C}$;

ξ_{ϕ} – удельная относительная пароемкость древесины фанеры, $\text{мг}/\text{кг}$, ее величину можно определить с помощью соотношений, аппроксимирующих изотермы сорбции влаги в древесине [9];

ρ_{ϕ} – плотность фанеры, $\text{кг}/\text{м}^3$;

μ_{ϕ} – коэффициент паропроводности фанеры, $\text{мг}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$.

Диффузия пара, связанная с градиентом температуры, как и в [2], не учитывается.

Уравнение (3) позволяет получать распределение парциальных давлений водяного пара в различных сечениях конструкции в заданные моменты времени и, используя изотермы сорбции, находить соответствующие равновесные влагосодержания материала. Если в процессе расчета к некоторому моменту времени относительная влажность воздуха ϕ в капиллярно-поровом пространстве материала станет больше или равна 1, это означает начало выпадения конденсата. В этом случае в порах материала содержится не только водяной пар, но и жидккая вода. Принято считать [2, 10], что вода и пар находятся в состоянии термодинамического равновесия и парциальное давление пара равно давлению насыщенного пара над поверхностью

воды при соответствующей температуре. При $\phi \geq 1$ (сверхсорбционная зона) для расчета перемещения влаги в элементах бруса из фанеры используется уравнение влагопроводности без слагаемого, связанного с перемещением влаги механизмами влагопроводности, которое для влагостойкой фанеры можно не учитывать ввиду его малости:

$$\frac{\partial w_\phi}{\partial \tau} = \mu_\phi \nabla^2 p_*(t_\phi), \quad (4)$$

где w_ϕ – влагосодержание фанеры, в долях единицы, кг/кг.

На границе, разделяющей сорбционную и сверхсорбционную зоны, задаются условия, обеспечивающие равенство абсолютных значений влагосодержания и потоков влаги.

Исходя из описанных выше подходов к моделированию тепловлагопереноса в ограждающих конструкциях, можно сформулировать систему уравнений, предназначенную для расчета нестационарных процессов распространения тепла и влаги в стенах малоэтажных зданий, выполненных из утепленного бруса повышенной прочности. Расчетный фрагмент стены из утепленного бруса с указанием расположения осей трехмерной декартовой системы координат показан на рис. 2.

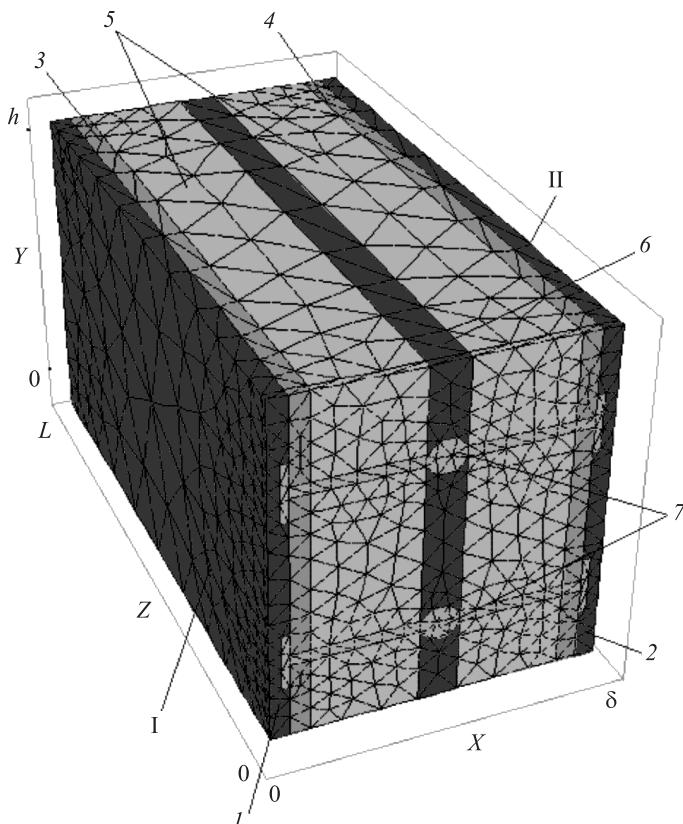


Рис. 2. Расчетный фрагмент стены из утепленного теплового бруса
1, 2 – профилированные продольные ламели; 3, 4 – слои фанеры; 5 – слои утеплителя;
6 – внутренняя продольная ламель; 7 – коннектор; I – наружная поверхность
стены; II – внутренняя поверхность стены

Для описания нестационарных процессов пространственного тепловлагопереноса в деревянных ламелях (см. рис. 1, 2) необходимо решить уравнение (2) совместно с уравнением теплопроводности

$$\frac{\rho_{0,\text{л}}}{3600} \frac{\partial c_{\text{л},i} t_{\text{л},i}}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda_{\text{л},i} \operatorname{grad} t_{\text{л},i}) + Q_{\text{л},i}, \quad (5)$$

где $\rho_{0,\text{л}}$ – плотность сухой древесины ламелей, кг/м³;

$c_{\text{л},i}$, $\lambda_{\text{л},i}$ – теплоемкость и теплопроводность влажной древесины ламелей в Дж/(кг · °C) и Вт/(м · °C) соответственно, которые в общем случае зависят от влагосодержания и температуры [9];

$Q_{\text{л},i} = \chi \rho_{0,\text{л}} r_{\text{в,л}} \frac{\partial (w_{\text{л},i} - w_{\text{с.ж},i})}{\partial \tau}$ – тепло, выделенное (поглощенное) при фазовых переходах [3], $\chi = 0$ при $w_{\text{л},i} < w_{\text{с.ж},i}$; $\chi = 1$ при $t_{\text{л},i} < t_{\text{зам}}$; $w_{\text{л},i} > w_{\text{с.ж},i}$; $\chi = -1$ при $t_{\text{л},i} \geq t_{\text{зам}}$; $w_{\text{л},i} > w_{\text{с.ж},i}$; $w_{\text{с.ж},i}$ – количество незамерзшей связанной влаги [3], в долях единицы, кг/кг; $r_{\text{в,л}}$ – удельная теплота фазового перехода воды–льда, кДж/кг.

Решение уравнений (2), (5) следует искать при следующих начальных и граничных условиях:

$$t_{\text{л},1} \Big|_{\tau=0} = t_{\text{внт}}, \quad w_{\text{л},1} \Big|_{\tau=0} = w_{\text{внт}}, \quad (6)$$

$$-\lambda_{\text{л}} \frac{\partial t_{\text{л},1}}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_0 (t_{\text{внт}} - t_{\text{л},1}) \Big|_{x=0}, \quad (7)$$

$$\lambda_{\text{л}} \frac{\partial t_{\text{л},2}}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = \alpha_w (t_{\text{внш}} - t_{\text{л},2}) \Big|_{x=\delta}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial t_{\text{л},i}}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial t_{\text{л},i}}{\partial y} \Big|_{y=h} = 0, \quad \frac{\partial t_{\text{л},i}}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial t_{\text{л},i}}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial w_{\text{л},i}}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial w_{\text{л},i}}{\partial y} \Big|_{y=h} = 0, \quad \frac{\partial w_{\text{л},i}}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial w_{\text{л},i}}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0,$$

$$-\rho_{0,\text{л}} k \left(\frac{\partial w_{\text{л},1}}{\partial x} + k_t \frac{\partial t_{\text{л},1}}{\partial x} \right) \Big|_{x=0} = \beta_0 (p_{\text{внт}} - p_{\text{л},1}) \Big|_{x=0}, \quad (10)$$

$$\rho_{0,\text{л}} k \left(\frac{\partial w_{\text{л},2}}{\partial x} + k_t \frac{\partial t_{\text{л},2}}{\partial x} \right) \Big|_{x=\delta} = \beta_w (p_{\text{внш}} - p_{\text{л},2}) \Big|_{x=\delta}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial w_{\text{л},i}}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad \frac{\partial w_{\text{л},i}}{\partial y} \Big|_{y=h} = 0, \quad \frac{\partial w_{\text{л},i}}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial w_{\text{л},i}}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0. \quad (12)$$

На внутренних границах $G_{\text{л}}$ (ламель–фанера, ламель–утеплитель) задаются условия непрерывности температуры и тепловых потоков:

$$t_{\text{л},i} \Big|_{G_{\text{л}}-0} = t \Big|_{G_{\text{л}}+0}, \quad \lambda_{\text{л}} \frac{\partial t_{\text{л},i}}{\partial n} \Big|_{G_{\text{л}}-0} = \lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Big|_{G_{\text{л}}+0}. \quad (13)$$

Для того чтобы вычислить $w_{\text{внт}}$ и связать значения $p_{\text{л},1}$, $p_{\text{л},2}$ с влагосодержаниями в граничных условиях (12, 13), а также найти величину $w_{\text{с.ж.},i}$, следует воспользоваться уравнениями изотерм сорбции [9].

При решении уравнения (2) на внутренних границах $G_{\text{л}}$ задаются условия непрерывности парциальных давлений пара, а поток влаги из древесины ламелей приравнивается к потоку пара в фанере или в утеплителе

$$p_{\text{л},i} \Big|_{G_{\text{л}}=0} = p \Big|_{G_{\text{л}}=0}, \quad \rho_{0,\text{л}} k \left(\frac{\partial w_{\text{л},i}}{\partial n} + k_t \frac{\partial t_{\text{л},i}}{\partial n} \right) \Big|_{G_{\text{л}}=0} = \frac{\mu}{3,6 \cdot 10^9} \frac{\partial p}{\partial n} \Big|_{G_{\text{л}}=0}. \quad (14)$$

Если относительная влажность воздуха на границе $G_{\text{л}}$ $\phi \geq 1$, то используется условие

$$\rho_{0,\text{л}} k \left(\frac{\partial w_{\text{л},i}}{\partial n} + k_t \frac{\partial t_{\text{л},i}}{\partial n} \right) \Big|_{G_{\text{л}}=0} = \frac{\mu}{3,6 \cdot 10^9} \frac{\partial p_{*}(t)}{\partial n} \Big|_{G_{\text{л}}=0}. \quad (15)$$

В соотношениях (6)–(15): $t_{\text{внт}}$, $w_{\text{внт}}$ – температура внутреннего воздуха и влагосодержание древесины, соответствующее этой температуре и влажности внутреннего воздуха, в $^{\circ}\text{C}$ и долях единицы, кг/кг соответственно; α_0 , α_w – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях стены, Вт/($\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$);

β_0 , β_w – коэффициенты пароотдачи на внутренней и наружной поверхностях стены, кг/($\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}$), для их определения используются данные [8];

$p_{\text{л},1}$, $p_{\text{л},2}$ – парциальные давления водяного пара на поверхности контакта внутренней и наружной ламели с воздухом, Па;

$p_{\text{внт}}$, $p_{\text{внш}}$ – парциальные давления водяного пара во внутреннем и наружном воздухе, Па;

$\frac{\partial}{\partial n}$ – градиенты по нормали к внутренним поверхностям контакта элементов утепленного теплового бруса.

Процесс тепловлагопереноса в коннекторах и слоях, склеенных с деревянными ламелями утепленного бруса (см. рис. 1, 2), выполненных из влагостойкой фанеры, моделируется тремя трехмерными нестационарными уравнениями в частных производных: (3), (4) и уравнением теплопроводности

$$\frac{\rho_{\phi} c_{\phi}}{3600} \frac{\partial t_{\phi}}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda_{\phi} \operatorname{grad} t_{\phi}) + Q_{\phi}, \quad (16)$$

где c_{ϕ} , λ_{ϕ} – теплоемкость и теплопроводность фанеры, Дж/(кг $\cdot ^{\circ}\text{C}$) и Вт/($\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}$) соответственно;

$Q_{\phi} = r_{\text{в.п}} \mu_{\phi} \frac{\partial p_{*}(t_{\phi})}{\partial x^2}$, $r_{\text{в.п}}$ – удельная теплота фазового перехода пар–вода, Вт/(ч \cdot кг).

Решение уравнений (3), (4), (16) должно удовлетворить следующим начальным условиям:

$$t_{\phi} \Big|_{\tau=0} = t_{\text{внт}}, \quad p_{\phi} \Big|_{\tau=0} = p_{\text{внт}}, \quad w_{\phi} \Big|_{\tau=\tau_w} = w_{\phi, \max}, \quad (17)$$

где $w_{\phi, \max}$ – максимальная сорбционная влажность фанеры, в долях единицы, кг/кг.

При решении уравнений (3), (4), (16) на границе фанера–ламель будем использовать граничные условия (13)–(15). На внутренних границах G_Φ (фанера–утеплитель) задаются условия непрерывности температуры и тепловых потоков, давления и потока пара:

$$t_\Phi|_{G_\Phi^-} = t|_{G_\Phi^+}, \quad \lambda_\Phi \frac{\partial t_\Phi}{\partial n} \Bigg|_{G_\Phi^-} = \lambda \frac{\partial t}{\partial n} \Bigg|_{G_\Phi^+}, \quad (18)$$

$$p_\Phi|_{G_\Phi^-} = p|_{G_\Phi^+}, \quad \mu_\Phi \frac{\partial p_\Phi}{\partial n} \Bigg|_{G_\Phi^-} = \mu \frac{\partial p}{\partial n} \Bigg|_{G_\Phi^+}. \quad (19)$$

На торцах выбранного расчетного фрагмента в элементах из фанеры задаются условия симметрии, аналогичные условиям (9).

Для моделирования тепломассообмена в пространственных областях, заполненных утеплителем, следует использовать уравнения, аналогичные соотношениям (3), (4), (16). Начальные условия к этим уравнениям записываются так же, как условия (17). Граничные условия, необходимые для определения решения уравнений влагопереноса в утеплителе, уже сформулированы выше: это соотношения (13)–(15), (18), (19).

Таким образом, уравнения (2)–(5), (16) вместе с аналогичными уравнениями для тепломассообмена в утеплителе и условия (6)–(15), (17)–(19) образуют физико-математическую модель, позволяющую проводить моделирование нестационарных трехмерных процессов тепловлагопереноса в ограждающих конструкциях из утепленного бруса. Для замыкания модели необходимо использовать соотношения, аппроксимирующие экспериментальные данные по сорбции влаги и теплофизическим характеристикам древесины, представленные в [3, 8, 9].

Сформулированная физико-математическая модель может быть использована для прогнозирования тепловлажностных характеристик новых конструкций утепленного бруса, предназначенных для создания энергоэффективных наружных ограждающих конструкций в деревянном домостроении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адамович А.Л., Грозберг Ю.Г., Бульбенкова Т.А., Кизина О.А. Моделирование тепловлагопереноса в древесине при досушке энергией СВЧ- поля // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Фундаментальные науки. Физика. 2013. № 4. С. 110–115.
2. Васильев Г.П., Личман В.А., Песков Н.В. Моделирование процесса сушки ограждающих конструкций зданий // Жилищное стр-во. 2013. № 7. С. 21–26.
3. Хуторной А.Н., Цветков Н.А., Кузин А.Я. Теплозащитные свойства неоднородных наружных стен зданий: монография. Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2006. 287 с.
4. Переходцев А.Г. Вопросы теории и расчета влажностного состояния неоднородных участков ограждающих конструкций зданий. Волгоград: ВолгГАСА, 1997. 273 с.
5. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. Л.: Госэнергоиздат, 1963. 536 с.
6. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. М.: Стройиздат, 1973. 287 с.

7. Цветков Н.А. Повышение эксплуатационных свойств кленого профилированного бруса с утеплителем // Вестн. ТГАСУ. 2012. № 2. С. 163–169.
8. Тимошенко А.Т., Ефимов С.С., Попов Г.Г. Ограждающие конструкции зданий с влажным режимом эксплуатации в экстремальных условиях Крайнего Севера. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1996. 200 с.
9. Жуков А.В. Инженерные формулы для расчета тепловлажностных свойств древесных материалов // Изв. вузов. Строительство. 2008. № 5. С. 81–84.
10. Бессонов И.В., Фомичев А.И. Моделирование нестационарного тепловлагопереноса в вентилируемой воздушной прослойке наружного ограждения здания // Вестн. МГСУ. 2011. № 3. С. 228–234.

Цветков Николай Александрович, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: nac.tsuab@yandex.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Хуторной Андрей Николаевич, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: khantgs@mail.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Толстых Александр Витальевич, канд. физ.-мат. наук, доц.;

E-mail: sinvintie@rambler.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Колесникова Анна Владимировна, канд. техн. наук, доц.;

E-mail: ann203040@yandex.ru

Томский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 16.01.17

Tsvetkov Nikolay Alexandrovich, DSc, Professor;

E-mail: nac.tsuab@yandex.ru

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

Khutornoy Andrey Nikolaevich, PhD, Ass. Professor;

E-mail: khantgs@mail.ru

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

Tolstykh Alexandre Vital'evich, PhD, Ass. Professor;

E-mail: sinvintie@rambler.ru

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

Kolesnikova Anna Vladimirovna, PhD, Ass. Professor;

E-mail: ann203040@yandex.ru

Tomsk State University of Architecture and Building, Russia

A PHYSICO-MATHEMATICAL MODEL

OF HEAT AND MOISTURE TRANSFER IN BUILDING

ENVELOPES SHAPED HEAT TIMBER

The urgency of the work is due to the need to determine the heat and moisture protection characteristics of promising energy-saving enclosing structures made of a heat-insulated timber of increased strength with transverse attachment of lamellas. The aim of the paper is a brief review of the problems arising in the mathematical modeling of heat and moisture transfer processes in complex structures with elements from wood, and a discussion of the methodology for developing the corresponding physical and mathematical models. A physico-mathematical model describing non-stationary three-dimensional heat and moisture transfer in the enclosing structures of buildings from a profiled heat-insulated timber with connectors and an internal longitudinal lamella is formulated. The model take into account the available experimental data on moisture sorption isotherms in wood, as well as the dependence of moisture conductivity and thermal conductivity on temperature

and humidity, which allowing you to more fully reflect the peculiarities of the studied process.

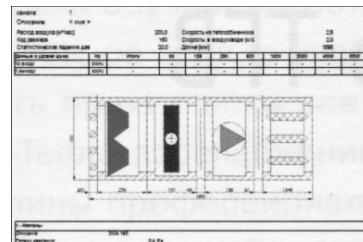
The presented physico-mathematical model is intended for research of heat and moisture processes in constructions made of wood glued profiled beam in order to increase their operational properties.

К e y w o r d s: shaped heat timber, physico-mathematical model, heat and moisture transfer, moisture conductivity, vapor conductivity, thermal conductivity, moisture sorption.

REFERENCES

1. Adamovich A.L., Grozberg Yu.G., Bul'benkova T.A., Kizina O.A. Modelirovaniye teplovlagoperenosov v drevesine pri dosuske energiey SVCH-polya [Modeling of heat and moisture in the wood at the final drying microwave energy field]. Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Fundamental'nye nauki. Fizika [Herald of Polotsk State University. Of fundamental science. Physics]. 2013. No. 4. Pp. 110–115. (in Russian)
2. Vasil'ev G.P., Lichman V.A., Peskov N.V. Modelirovaniye protsessov sushki ograzhdayushchikh konstruktsiy zdaniy [Modelling of the drying process of building envelopes]. Zhilishchnoe stroitel'stvo [Housing]. 2013. No. 7. Pp. 21–26 (in Russian)
3. Khutornoy A.N., Tsvetkov N.A., Kuzin A.Ya. Teplozashchitnye svoystva neodnorodnykh naruzhnykh sten zdaniy: monografiya [Heat properties of inhomogeneous external walls of buildings: a monograph]. Tomsk, Publishing house of Tomsk State University of Architecture and Building, 2006. 287 p. (in Russian)
4. Perekhozhentsev A.G. Voprosy teorii i rascheta vlazhnostnogo sostoyaniya neodnorodnykh uchastkov ograzhdayushchikh konstruktsiy zdaniy [Theory and calculation of humidity state of inhomogeneous sections of building envelopes]. Volgograd, Volgograd State Academy of Architecture and Building, 1997. 273 p. (in Russian)
5. Lykov A.V., Mikhaylov Yu.A. Teoriya teplo- i massoperenosov [The theory of heat and mass transfer]. Leningrad, Gosenergoizdat, 1963. 536 p. (in Russian)
6. Fokin K.F. Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchikh chastej zdaniy [Building heat engineering of enclosing parts of buildings]. Moscow, Stroyizdat, 1973. 287 p. (in Russian)
7. Tsvetkov N.A. Povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv kleenogo profilirovannogo brusa c uteplitelem [Increase of operational properties of glued shaped heat timber c insulation]. Vestnik TGASU [Herald of Tomsk State University of Architecture and Building]. 2012. No. 2. Pp. 163–169. (in Russian)
8. Timoshenko A.T., Efimov S.S., Popov G.G. Ograzhdayushchie konstruktsii zdaniy s vlazhnym rezhimom ekspluatatsii v ekstremal'nykh usloviyakh Kraynego Severa [Of the building envelope with a damp mode of operation in the extreme conditions of the far North]. Yakutsk, Yakut Scientific Center Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, 1996. 200 p. (in Russian)
9. Zhukov A.V. Inzhenernye formuly dlya rascheta teplovlaghnostnykh svoystv drevesnykh materialov [Engineering formulas for calculating the heat and humidity properties, wood-based materials]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2008. No. 5. Pp. 81–84. (in Russian)
10. Bessonov I.V., Fomichev A.I. Modelirovaniye nestatsionarnogo teplovlagoperenosov v ventiliruemoy vozduшnoy prosloyke naruzhnogo ograzhdeniya zdaniya [Simulation of transient heat and moisture transfer in ventilated air gap, the outer fences of the building]. Vestnik MGSU [Herald of Moscow State University of Civil Engineering]. 2011. No. 3. Pp. 228–234. (in Russian)

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ



УДК 624.072.012.45

Ю.В. НЕМИРОВСКИЙ

ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ БАЛОК НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

Исследованы предельно допустимые состояния балок на упругом основании. Использованы модели идеального и линейно-упрочняющегося материалов балок и модель линейно-упругого отпора основания. В качестве критерия предельно допустимого состояния системы «балка–основание» предлагается использовать критерий предельно допустимых деформаций для решения задач для балок при различных условиях закрепления на опорных контурах.

Ключевые слова: балки, упругое основание, идеально пластические и линейно-упрочняющиеся материалы, шарнирное опирание, защемление, предельно допустимые деформации, первая и вторая предельные нагрузки.

Первоначальные основы предельного равновесия стержневых и пластиначатых элементов конструкций строительной индустрии были разработаны А.А. Гвоздевым [1, 2] и его последователями [3, 4]. Положенная в расчетную схему модель идеального жесткопластического материала позволила достаточно простыми методами определять предельные нагрузки несущей способности, а также их верхние (кинематически возможные) или нижние (статически возможные) значения для широкого класса разнообразных конструкций. Соответствующий математический аппарат пригоден для расчетов конструкций из однородных и композитных материалов в случае, когда все фазовые материалы являются идеально пластическими. В случае, когда часть или все материалы обладают упрочнением, потребовалось развитие расчетной модели и понятия несущей способности конструкции, отвечающих амплитуде нагрузки начального разрушения в соответствии с концепцией теории слабейшего звена. Такая предельная нагрузка в отличие от классической (первой) предельной нагрузки была названа второй предельной нагрузкой [5]. Она определяется для композитных конструкций во всех случаях, когда хотя бы один из фазовых материалов будет обладать упрочнением. В строительной практике часто встречаются ситуации [6, 7], когда деформирование конструкции сопровождается отпором окружающей среды и возникает вопрос об оценке несущей способности конструкции при наличии такого отпора. В рамках классической теории предельного равновесия

этот вопрос не был рассмотрен и в данной работе будет исследован применимельно к изгибу балок на упругом основании.

Будем считать, что балки изготовлены из идеальных или линейно-упрочняющихся однородных или слоисто-волокнистых композитных материалов [1, 2], закрепленных на опорах, нагружены распределенной нагрузкой $q(x) = q_0 \phi(x)$ и находятся в соприкосновении со средой, подчиняющейся закону упругого сопротивления. Тогда уравнение изгиба балки будет иметь вид

$$\frac{d^2 M}{dx^2} = q(x) - k_1 w(x), \quad k_1 = 2b_0 k_2, \quad (1)$$

где $2b_0$ – ширина опорного сечения;
 k_2 – коэффициент упругого сопротивления;
 M – изгибающий момент;
 w – прогиб.

Характер деформирования балок на упругом основании и их несущая способность будут зависеть от условий внешнего нагружения и закрепления балок, форм сечения, структуры распределения и свойств материала в сечении. Поэтому далее для простоты и определенности ограничимся двумя типами составляющих материалов: а) все материалы – идеально пластические, б) все материалы – пластические линейно-упрочняющиеся.

Идеально пластические материалы. Если все материалы идеально пластические, то в процессе предельного деформирования в балке могут быть реализованы два состояния: жесткое, для которого $\frac{d^2 w}{dx^2} = 0$, или пластическое, для которого $M(x) = M_0$, где M_0 – предельный изгибающий момент сечения балки. На границе этих состояний должны выполняться условия непрерывности перерезывающих сил, моментов и прогибов. Для выполнения этих требований необходима определенная конкретизация условий внешнего нагружения и закрепления конструкций. Поэтому рассмотрим далее некоторые иллюстрированные примеры.

A. Консольная балка длины l с защемленным $x = 0$ и свободным краем $x = l$ нагружена распределенной нагрузкой $q(x) = q_0 = \text{const}$. В этом случае до достижения первой (классической) предельной нагрузки q_0^0 балка будет абсолютно жесткой и система «балка – основание» будет недеформируемой. При превышении первой предельной нагрузки $q_0 > q_0^0$ происходит деформирование системы «балка – основание» в соответствии с условиями:

$$w = \frac{w_0 x}{l}, \quad (0 \leq x \leq l), \quad Q(l) = 0, \quad M(l) = 0, \quad M(0) = -M_0, \quad Q(x) = \frac{dM}{dx}. \quad (2)$$

Учитывая эти условия, после интегрирования уравнения (1) получим зависимость:

$$k_1 w_0 = \frac{9}{2}(q_0^0 - q_0), \quad M(x) = q_0(x-l)^2 - \frac{k_1 w_0}{6l}(x^3 - 3x^2 l + 2l^3), \quad (3)$$

$$Q(x) = (x-l) \left[q_0 - k_1 w_0 \frac{(x+l)}{2l} \right].$$

При $w_0 = 0$ получим первую предельную нагрузку

$$q_0^0 = \frac{2M_0}{l^2}. \quad (4)$$

При $q > q_0^0$ происходит деформация системы балка – упругое состояние до тех пор, пока модуль деформации во внешней фибре защемленного сечения не достигнет предельно допустимого значения ε_* . Учитывая, что предельная деформация в опорном сечении балки с точностью до малых второго порядка равна [8, 9]

$$\varepsilon_* = \left(\frac{w_0^*}{l} \right)^2,$$

для второй предельной нагрузки получим выражение

$$q_0^* = q_1^0 + \frac{2lk_1\sqrt{\varepsilon_*}}{9}.$$

Дальнейшая эксплуатация системы «балка – основание» станет невозможной из-за активного развития трещиноватости в зоне защемления балки. Возможно также образование второго предельного состояния при нарушении закона упругого состояния основания. В этом случае необходимо будет заменить уравнение (2) при учете соответствующего закона неупругого сопротивления. Однако мы этот случай рассматривать не будем.

Б. Шарнирно опертая (зашемленная) балка длины $2l$, нагруженная равномерно распределенной нагрузкой q_0 . В силу симметрии условий нагружения и закрепления достаточно рассмотреть половину пролета $0 \leq x \leq l$. Тогда в предельном состоянии часть балки $0 \leq x \leq x_*$ будет оставаться жесткой и для нее $\kappa = 0$, а часть $x_* \leq x \leq l$ – пластической, для нее $M(x) = M_0 = \text{const}$. Границные условия имеют вид:

$$w(0) = 0, \quad \left. \frac{dw}{dx} \right|_{x=l} = 0, \quad \left. \frac{dM}{dx} \right|_{x=x_*} = 0, \quad M(x_*) = M_0, \quad M(0) = \alpha M_0, \quad (5)$$

$$\alpha = \begin{cases} 0 & \text{при шарнирном закреплении балки,} \\ -1 & \text{при защемлении опоры.} \end{cases}$$

Учитывая условия (5), после интегрирования уравнения (1) получим в области $0 \leq x \leq x_*$:

$$w = \frac{x}{x_*} w_0, \quad M(x) = q_0 x \left(\frac{x}{2} - x_* \right) - \frac{k_1 w_0 x}{6x_*} (x^2 - 3x_*^2) + \alpha M_0, \quad (6)$$

$$Q(x) = q_0(x - x_*) - \frac{k_1 w_0}{2x_*} (x^2 - x_*^2).$$

В области $x_* \leq x \leq l$:

$$w = w_0, \quad M(x) = M_0, \quad Q(x) = 0. \quad (7)$$

Из условий непрерывности изгибающего момента на границе $x = x_*$ получим

$$M_0 = \alpha M_0 + \left(\frac{k_1 w_0}{3} - \frac{q_0}{2} \right) x_*^2. \quad (8)$$

Из этого выражения при $x_* = l$ и $w_0 = 0$ получим формулу для первой предельной нагрузки

$$q_0^0 = \frac{2(1-\alpha)M_0}{l^2} \quad (9)$$

и при $w_0 = \sqrt{\varepsilon_*} x_*$ – формулу для второй предельной нагрузки

$$q_0^* = q_0^0 + \frac{k_1 \sqrt{\varepsilon_*} x_* l}{3}. \quad (10)$$

В. Балка длины l , нагруженная равномерно распределенной нагрузкой q_0 . Левый край $x=0$ шарнирно оперт, правый защемлен. В предельном состоянии деформирования балка состоит из трех участков: двух жестких в окрестностях $0 \leq x \leq x_1^*$, $x_2^* \leq x \leq l$ опор и пластического участка $x_1^* \leq x \leq x_2^*$ в пролете. В результате будем иметь условия:

$$w(0) = w(l) = 0, \quad w(x_1^*) = w(x_2^*) = w_0, \quad M(x_1) = M(x_2) = M_0, \quad M(l) = -M_0,$$

$$\left. \frac{dM}{dx} \right|_{x_1^*} = 0, \quad \left. \frac{dM}{dx} \right|_{x_2^*} = 0, \quad (11)$$

при $0 \leq x \leq x_1^*$ и $x_2 \leq x \leq l$

$$\frac{d^2w}{dx^2} = 0, \quad (12)$$

при $x_1 \leq x \leq x_2$

$$M(x) = M_0, \quad w(x) = w_0. \quad (13)$$

Учитывая эти условия, после интегрирования уравнения (1) получим в области $0 \leq x \leq x_1^*$

$$w(x) = \frac{w_0 x}{x_1^*}, \quad M(x) = \frac{q_0 x}{2} (x - 2x_1^*) - \frac{k_1 w_0 x}{6x_0} (x^2 - 3x_1^2).$$

Учитывая условия $M(x_1^*) = M_0$, получим зависимость

$$\frac{6M_0}{x_1^2} + 2k_1 w_0 = 3q_0, \quad (14)$$

в области $x_1^* \leq x \leq x_2^*$:

$$w_0 = \frac{q_0}{k_1}, \quad M(x) = M_0 \quad (15)$$

и в области $x_2^* \leq x \leq l$:

$$w = \frac{w_0(l-x)}{(l-x_2^*)}, \quad (16)$$

$$M(x) = M_0 - \frac{q_0(x-x_2)}{6(l-x_2^*)} [x^2 + xx_2 + x_2^2 - 3xx_2]. \quad (17)$$

Учитывая условие $M(l) = -M_0$, получим $q_0 = \frac{12M_0}{(l-x_2^*)^2}$.

Если хотя бы один из фазовых материалов композитной балки обладает упрочняющимися свойствами, то пластическое состояние балки также будет обладать свойством упрочнения. Тогда, принимая для удобства и простоты предположение о том, что все составляющие фазовые материалы подчиняются зависимостям линейно-упрочняющегося жесткопластического материала, будем иметь зависимости [7]:

$$M = M_0 \operatorname{sign}\kappa + D_1 \kappa, \quad \kappa \neq 0, \quad D_1 \neq 0, \quad (18)$$

$$\kappa = 0, \quad -M_0 \leq M \leq M_0. \quad (19)$$

Таким образом, в общем случае в предельном состоянии балка разбивается на ряд участков с жестким состоянием и участков с пластическим состоянием деформирования. Если участок $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ остается жестким $|M| \leq M_0$, то для него $w(x) = C_{1i}x + C_{2i}$, C_{1i} , C_{2i} – постоянные.

Учитывая эту зависимость, при интегрировании уравнения (1) на участке (x_i, x) будем иметь:

$$Q_i(x) = Q_i^0 - \int_{x_i}^x q(x) dx + \frac{k_i(x-x_i)}{2} [C_{1i}(x+x_i) - C_{2i}], \quad (20)$$

$$M_i(x) = M_i^0 + (x-x_i) \times \\ \times \left\{ Q_i^0 + \frac{k_1}{2} \left[\frac{C_{1i}}{3} (x^2 + xx_i - 2x_i^2) + 3C_{2i}(x-x_i) \right] \right\} + \int_{x_i}^x \left[\int_{x_i}^x q(x) dx \right] dx,$$

где Q_i^0 , M_i^0 – значения перерезывающей силы и изгибающего момента в сечении $x=x_i$.

Если для пластического участка закон деформирования балки соответствует равенству (18), то уравнение равновесия (1) для этого участка можно привести к виду

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + 4k_3^4 w = p(x), \quad (21)$$

$$\text{где } 4k_3^4 = \frac{k_1}{D_3}, \quad p(x) = \frac{q(x)}{D_1}.$$

Это уравнение с точностью до обозначений совпадает с широко известным уравнением упругих балок на упругом основании [10, с. 151], и его общее решение имеет вид

$$w(x) = A_1 \sin k_3 x \operatorname{sh} k_3 x + A_2 \sin k_3 x \operatorname{ch} k_3 x + \\ + A_3 \cos k_3 x \operatorname{sh} k_3 x + A_4 \cos k_3 x \operatorname{ch} k_3 x + w^*(x), \quad (22)$$

где $\operatorname{sh} k_3 x$ и $\operatorname{ch} k_3 x$ – гиперболический синус и косинус;

$w^*(x)$ – частное решение уравнения (21);

A_1, A_2, A_3, A_4 – постоянные интегрирования в общем решении.

Таким образом, в общем случае рассматриваемой задачи балка разбивается на ряд жестких и пластических участков, для каждого из которых получено аналитическое решение с точностью до набора произвольных постоянных, которые должны быть найдены из условий нагружения балки на краях и условий непрерывности в точках сопряжения жестких и пластических участков. Условиями непрерывности в точках сопряжения являются требования непрерывности функции прогиба, ее первой и второй производных, непрерывности моментов и перерезывающих сил. Для нахождения точек сопряжений жестких и пластических участков следует выполнить условия равенства нулю перерезывающих сил в этих точках. Решение задачи сводится к необходимости решения системы алгебраических уравнений. В итоге решение рассматриваемых задач становится не намного более трудным, чем решение аналогичных задач для балок на упругом основании. Вследствие неизвестного заранее расположения жестких и пластических участков (а иногда даже их количества) выписать в общем виде процедуру получения решения задач для произвольных условий нагружения и закрепления балок не представляется возможным. Поэтому мы ограничимся здесь описанием процедуры решения на двух наводящих примерах. Пусть балка длины l шарнирно оперта по краям, изготовлена из линейно-упрочняющегося жесткопластического материала и нагружена равномерно распределенной нагрузкой интенсивности q_0 . В этом случае в силу симметрии условий нагружения и закрепления балки достаточно рассмотреть ее половину $0 \leq x \leq \frac{l}{2}$. Тогда в предельном состоянии полубалка будет состоять из двух участков: жесткого в окрестности опоры ($0 \leq x \leq x_1$) и пластического в окрестности середины пролета $x_1 \leq x \leq \frac{l}{2}$. Для нахождения соответствующих констант интегрирования и точки сопряжения x_1 должны быть выполнены условия:

$$w(0) = 0, M(0) = 0, Q(x_1) = 0, M(x_1) = M_0, \left. \frac{d^2 w}{dx^2} \right|_{x_1} = 0, \left. \frac{dw}{dx} \right|_{\frac{l}{2}} = 0,$$

$$Q\left(\frac{l}{2}\right) = 0, [Q]_{x_1} = 0, [M]_{x_1} = 0,$$

где $[...]_{x_1}$ – скачок функции в точке x_1 .

После определения констант интегрирования определяем $\left. \frac{d^2 w}{dx^2} \right|_{\frac{l}{2}}$ и затем

из уравнения $\left. \frac{d^2 w}{dx^2} \right|_{\frac{l}{2}} H = \varepsilon^*$ находим амплитуду предельной нагрузки. Если

рассматриваемая балка будет шарнирно опертой на левом краю $x = 0$ и защемленной на правом краю $x = l$, то при деформировании в предельном состоянии она будет состоять из четырех участков: двух жестких $0 \leq x \leq x_1$,

$x_2 \leq x \leq x_3$, $\kappa = 0$ и двух пластических $x_1 \leq x \leq x_2$ при $\kappa > 0$ и $x_3 \leq x \leq l$ при $\kappa < 0$. Здесь очевидно, какие условия должны быть выписаны на левой опоре в точках сопряжения x_1, x_2, x_3 . Особенной точкой здесь является правый конец $x = l$ балки, для которого должно быть выполнено условие $w(l) = \frac{dw}{dx} \Big|_l = 0$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гвоздев А.А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия. М.: Стройиздат, 1949.
2. Гвоздев А.А. О развитии теории расчета железобетонных конструкций в СССР. Теория расчета бетонных и железобетонных конструкций. М.: Стройиздат, 1949. С. 3–18.
3. Ржаницын А.Р. Расчет сооружений с учетом пластических свойств материалов. М.: Госстройиздат, 1954. 287 с.
4. Ерхов М.И. Теория идеально пластических тел и конструкций. М.: Наука, 1978.
5. Немировский Ю.В. Второе предельное состояние однородных и композитных балок // Вестн. Чуваш. гос. пед. ун-та им. И.Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния. 2009. № 1. С. 150–159.
6. Савельев Н.Г. Расчет балок переменного сечения на упругом основании // Расчеты на прочность. М.: Машгиз, 1956. Вып. 1.
7. Горбунов-Посадов М.И. Балки и плиты на упругом основании. М.: Машстройиздат, 1949.
8. Немировский Ю.В. Динамический изгиб армированных пластических стержней // Динамика сплошной среды. Новосибирск: Институт гидродинамики СО АН СССР, 1979. Вып. 41. С. 37–44.
9. Найдя А.А. Оценка остаточных деформаций импульсно нагруженных балок // Прикладная механика. 1986. Т. 22, № 3. С. 66–71.
10. Федосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Физматгиз, 1963. 539 с.

Немировский Юрий Владимирович, д-р физ.-мат. наук, проф.;

E-mail: nemirov@itam.nsc.ru

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск

Получено после доработки 19.01.17

Nemirovskiy Yuriy Vladimirovich, DSc, Professor; E-mail: nemirov@itam.nsc.ru
Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

LIMIT STATES BEAMS ON ELASTIC FOUNDATION

We investigated the maximum allowable state of beams on elastic foundation. We used a model of the ideal and linear hardening material and model beams linearly elastic resistance base. As a criterion of maximum allowable state of «beam-foundation» of the system is proposed to use the maximum allowable strain criterion for the solution of problems for beams at different fixing conditions on the reference circuits.

Keywords: beams, elastic foundation, perfectly-plastic and linear-hardening materials, swivel bearing, pinched, maximum permissible deformation, the first and second load limits.

REFERENCES

1. G v o z d e v A.A. Raschet nesushchey sposobnosti konstruktsiy po metodu predel'nogo ravnovesiya [Calculation of bearing capacity of structures by the method of limit equilibrium]. Moscow, Stroyizdat, 1949. (in Russian)
 2. G v o z d e v A.A. O razvitiu teorii rascheta zhelezobetonnykh konstruktsiy v SSSR. Teoriya rascheta betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy [On the development of the theory of calculation of reinforced concrete structures in the USSR. The theory calculation of concrete and reinforced concrete structures]. Moscow, Stroyizdat, 1949. Pp. 3–18. (in Russian)
 3. R z h a n i t s y n A.R. Raschet sooruzheniy s uchetom plasticheskikh svoystv materialov [Calculation structures based plastic material properties]. Moscow, Gosstroyizdat, 1954. 287 p. (in Russian)
 4. E r k h o v M.I. Teoriya ideal'no plasticheskikh tel i konstruktsiy [The theory of the ideal plastic bodies and structures]. Moscow, Science, 1978. (in Russian)
 5. N e m i r o v s k i y Yu.V. Vtoroe predel'noe sostoyanie odnorodnykh i kompozitnykh balok [The second limit state homogeneous and composite beams]. Vestnik Chuvashskogo gos. ped. un-ta im I.Ya. Yakovleva. Ser. Mekhanika predel'nogo sostoyaniya [Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University I.Ya. Yakovlev. A series of «Mechanics of a limiting condition»]. 2009. No. 1. Pp. 150–159. (in Russian)
 6. S a v e l ' e v N.G. Raschet balok peremennogo secheniya na uprugom osnovanii [Calculation of variable section beams on an elastic foundation]. Raschety na prochnost' [Calculations of strength]. Moscow, Mashgiz, 1956. Issue 1. (in Russian)
 7. G o r b u n o v - P o s a d o v M.I. Balki i plity na uprugom osnovanii [Beams and plates on elastic foundation]. Moscow, Mashstroyizdat, 1949. (in Russian)
 8. N e m i r o v s k i y Yu.V. Dinamicheskiy izgib armirovannykh plasticheskikh sterzhney [The dynamic bending of reinforced plastic rods]. Dinamika sploshnoy sredy [Dynamics of Continuous Media]. Novosibirsk, Institute of Hydrodynamics SB RAS, 1979. Issue 41. Pp. 37–44. (in Russian)
 9. N a y d a A.A. Otsenka ostatochnykh deformatsiy impul'sno nagruzhennykh balok [Evaluation of residual strain pulsed beams loaded]. Prikladnaya mekhanika [Applied Mechanics]. 1986. Vol. 22. No. 3. Pp. 66–71. (in Russian)
 10. F e o d o s ' e v V.I. Soprotivlenie materialov [Strength of materials]. Moscow, Fizmatgiz, 1963. 539 p. (in Russian)
-

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА



УДК 69.05 : 658.512.6

Ю.Б. КАЛУГИН, Р.Ю. ТУПИЦЫН

ВЫБОР РАБОТ ДЛЯ «СЖАТИЯ» КРИТИЧЕСКОГО ПУТИ КАЛЕНДАРНОГО ГРАФИКА

Изложен способ выбора приоритетных работ для начального этапа оптимизации календарного графика по срокам при нелинейном характере изменения продолжительности выполнения работ от количества ресурсов. Предлагается поиск рациональной стратегии «сжатия» календарного графика на первом этапе его оптимизации, когда существует единственный критический путь. Работы, обеспечивающие заданное «сжатие», определяются минимальной скоростью роста числа привлекаемых ресурсов при единичном сокращении продолжительности работы. Представлен пример сокращения планируемой продолжительности работ критического пути календарного графика. Реализация предлагаемых подходов позволит еще на стадии планирования определить работы, подлежащие оптимизации, рассчитать величину сокращения их продолжительности и число привлекаемых ресурсов.

Ключевые слова: календарное планирование и управление проектом, метод критического пути, оптимизация календарных графиков по срокам.

Строительство и восстановление объектов – это сложный процесс, включающий большое количество разнообразных работ, выполняемых различными исполнителями и отображаемый календарными графиками (планами). Очень часто на стадии формирования календарных планов и графиков возникает задача сокращения общей продолжительности. Кроме того, при оперативном управлении ходом работ необходимо также корректировать календарный график по срокам.

Обычно, когда построенный календарный график не обеспечивает заданные (директивные) временные параметры, необходимо рассмотрение и последующая реализация возможностей по привлечению дополнительных (перераспределению существующих) ресурсов. При этом скорректированный календарный график должен обеспечить срок работ меньший или равный директивному при минимальном привлечении дополнительных (перераспределении существующих) ресурсов.

Существующей проблеме оптимизации календарных графиков по срокам (обмена времени на стоимость с целью ускорения реализации проекта с наименьшими дополнительными затратами) уделялось значительное

внимание в различных исследованиях [1–12]. При этом общая схема проведения оптимизации «время–затраты» заключается в следующем:

- исходя из нормальных (максимальных) длительностей работ графика определяются критические и подкритические пути сетевой модели и их длительности;
- определяется сумма затрат на выполнение всего комплекса работ при нормальной (максимальной) продолжительности;
- для критических работ рассчитываются коэффициенты нарастания затрат, показывающие затраты средств, необходимые для сокращения работы на один день;
- для сокращения выбирается критическая работа с минимальным значением коэффициента нарастания затрат;
- производится перерасчет сетевой модели.

Схожий подход оптимизации календарных графиков по срокам за счет перераспределения ресурсов изложен в [13]. Отличие лишь в том, что к оптимизации принимается работа критического пути, дающая максимальное сокращение при перераспределении на нее единицы дополнительного ресурса.

Большинство исследований, посвященных проблеме уплотнения (сжатия) календарных планов, основываются на детерминированных оценках продолжительностей выполнения работ. Вероятностные значения продолжительностей отдельных работ, вызванные влиянием случайных факторов, значительно усложняют задачу оптимизации (сжатия календарного плана), прежде всего за счет значительного смещения в сторону увеличения итоговых значений продолжительности.

Так, в работах [14–18] установлено, что смещение математического ожидания сроков выполнения комплекса работ от детерминированных оценок может достигать 20–30 %. В некоторых случаях были получены парадоксальные результаты – для насыщенного сетевого графика с вероятностными временными параметрами и несколькими критическими путями его планируемое «сжатие» за счет привлекаемых ресурсов привело к увеличению расчетных сроков [16].

В ряде работ проблема оптимизации графиков по срокам решается с использованием потоковых алгоритмов и методов линейного программирования [2, 4, 19–21]. Она формулируется следующим образом. Дан плоский граф, соответствующий организационно-технологической модели выполнения всех работ в режиме с минимальной интенсивностью. Известно директивное время выполнения проекта. Требуется скорректировать организационно-технологическую модель по продолжительности отдельных работ и соответствующим ресурсам (сформировать календарный график) с целью минимизации привлекаемых дополнительных ресурсов для выполнения работ в установленные сроки.

При этом возможен различный характер изменения продолжительности выполнения работы от количества ресурсов как линейный (зависимость 1, рис. 1), так и нелинейный (зависимость 2).

Реальные условия производства строительно-восстановительных работ показывают преобладание нелинейного характера такой зависимости (кривая 2). И действительно, по мере насыщения фронта работ ресурсами величи-

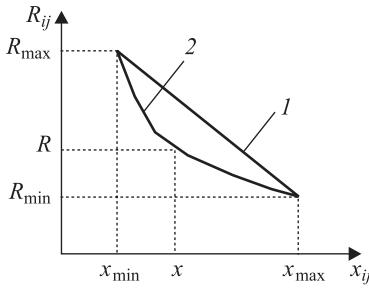


Рис. 1. Зависимости продолжительности работы x_{ij} от числа ресурсов R_{ij}

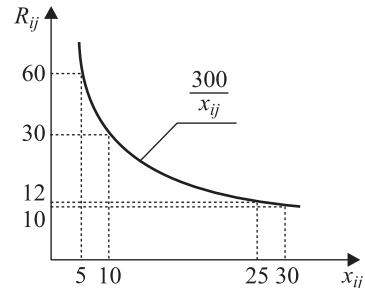


Рис. 2. Нелинейный характер зависимости продолжительности работы x_{ij} от числа ресурсов R_{ij}

на сокращения продолжительности работы от привлечения единицы ресурса снижается. Так, для сокращения продолжительности работы, имеющей ресурсоемкость 300 человеко-дней, с 30 до 25 потребуется 2 единицы ресурса. При сокращении этой же работы с 10 до 5 дней уже потребуется 30 единиц ресурса (рис. 2).

Пусть

$$\Delta R_{ij} = R_{ij} - R_{ij}^{\min}. \quad (1)$$

$$\text{Или } \Delta R_{ij} = \frac{T_{ij}}{t_{ij}} - \frac{T_{ij}}{t_{ij}^{\max}} = \frac{T_{ij}(t_{ij}^{\max} - t_{ij})}{t_{ij}^{\max}(t_{ij}^{\max} - \Delta t_{ij})} = \frac{T_{ij} \times \Delta t_{ij}}{t_{ij}^{\max}(t_{ij}^{\max} - \Delta t_{ij})}. \quad (2)$$

Здесь T_{ij} – трудоемкость (ресурсоемкость) работы ij ;

t_{ij} – продолжительность работы ij ;

t_{ij}^{\max} – максимальная продолжительность работы ij ;

Δt_{ij} – величина сокращения продолжительности работы ij .

Тогда зависимость между ΔR_{ij} и Δt_{ij} будет иметь следующий вид (рис. 3).

Скорость изменения числа привлекаемых ресурсов при изменении продолжительности работы может быть выражена первой производной от ΔR_{ij} .

$$\Delta R'_{ij} = \frac{d\Delta R_{ij}}{d\Delta t_{ij}}. \quad (3)$$

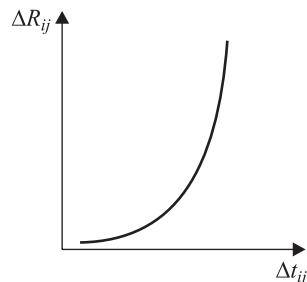


Рис. 3. Нелинейный характер зависимости изменения продолжительности работы Δt_{ij} от изменения числа ресурсов ΔR_{ij}

Выражение (3) можно использовать для поиска рациональной стратегии сжатия календарного графика на первом этапе его оптимизации, когда существует единственный критический путь.

Пусть критический путь графика проходит через события 7–8–9–11 (Γ – работа некритического пути) (рис. 4).

Общая продолжительность критического пути при максимальной продолжительности каждой работы (минимальной интенсивности) состав-

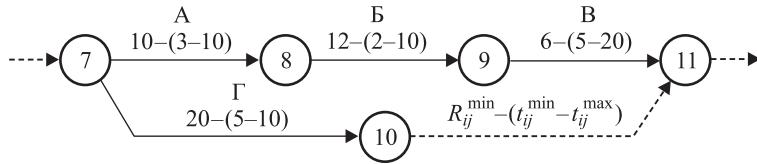


Рис. 4. Фрагмент критического пути

ляет 40 дней. Допустимая величина продолжительности комплекса работ А–Б–В 23 дня. Требуемая величина сокращения критического пути – $\Delta T_{\text{АБВ}} = 17$ дней.

Необходимо определить величину сокращения продолжительности каждой работы при условии минимального привлечения дополнительных ресурсов

$$\Sigma \Delta R_{ij} \Rightarrow \min \quad (4)$$

и выполнении условия

$$\Sigma \Delta t_{ij} = \Delta T_{\text{АБВ}}, \quad (5)$$

где Δt_{ij} – величина сокращения продолжительности работы ij ;

ΔR_{ij} – прирост ресурса на работу ij для сокращения ее продолжительности на величину Δt_{ij} .

Трудоемкость (ресурсоемкость) каждой работы постоянная. Минимальное число ресурсов, соответствующее максимальной продолжительности работы, определяется технологическими особенностями. Максимальное число ресурсов, соответствующее минимальной продолжительности, определяется минимальной величиной фронта работы единицы ресурса.

Тогда, с учетом (2) и (3):

$$\Delta R_{7-8} = \frac{100}{10} \left(\frac{\Delta t_{7-8}}{10 - \Delta t_{7-8}} \right), \quad (6)$$

$$\Delta R'_{7-8} = \frac{100}{(10 - \Delta t_{7-8})^2}, \quad (7)$$

$$\Delta R_{8-9} = \frac{120}{10} \left(\frac{\Delta t_{8-9}}{10 - \Delta t_{8-9}} \right), \quad (8)$$

$$\Delta R'_{8-9} = \frac{120}{(10 - \Delta t_{8-9})^2}, \quad (9)$$

$$\Delta R_{9-11} = \frac{120}{20} \left(\frac{\Delta t_{9-11}}{20 - \Delta t_{9-11}} \right), \quad (10)$$

$$\Delta R'_{9-11} = \frac{120}{(20 - \Delta t_{9-11})^2}. \quad (11)$$

Графическая интерпретация зависимостей (6)–(11) представлена на рис. 5, 6.

Очевидно, что в первую очередь должна сокращаться работа 9–11, обеспечивающая минимальный прирост числа ресурсов при единичном сокраще-

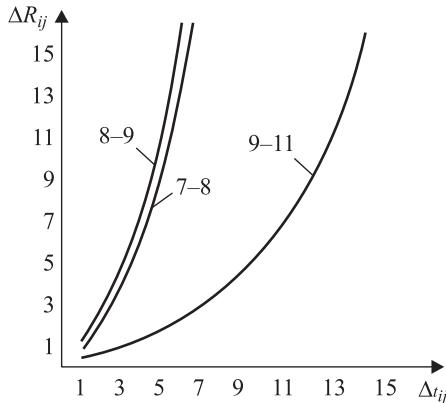


Рис. 5. Зависимости изменения прироста ресурсов ΔR_{ij} от величины сокращения продолжительности работы Δt_{ij}

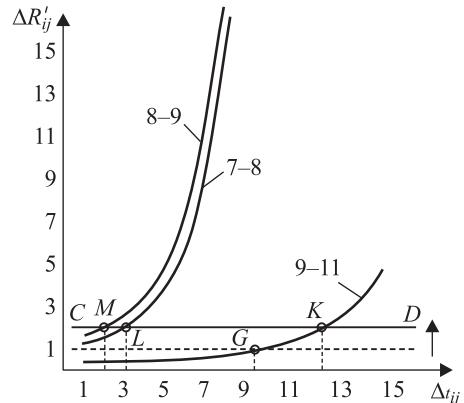


Рис. 6. Зависимости изменения скорости изменения прироста ресурсов от величины сокращения продолжительности работы Δt_{ij}

ния продолжительности (максимальное сокращение продолжительности работы при единичном приросте ресурсов).

Отметим точку G на графике (рис. 6), соответствующем работе 9–11. В этой точке при величине сокращения продолжительности работы $\Delta t_{ij} = 9$ скорость прироста ресурсов составляет $\Delta R'_{ij} = 1$ (0,99 с учетом (11)).

Пусть прямая CD перемещается параллельно оси абсцисс до пересечения с соответствующими графиками (в точках K, L, M). В этих точках скорость изменения числа привлекаемых ресурсов при изменении продолжительности работы одинакова, т.е.

$$\frac{100}{(10-\Delta t_{7-8})^2} = \frac{120}{(10-\Delta t_{8-9})^2} = \frac{120}{(20-\Delta t_{9-11})^2}. \quad (12)$$

Кроме того, в соответствии с (5)

$$\Delta t_{7-8} + \Delta t_{8-9} + \Delta t_{9-11} = 17. \quad (13)$$

Совместное решение уравнений (12) и (13) позволяет установить, что

$$\Delta t_{7-8} = 2,792; \quad \Delta t_{8-9} = 2,104; \quad \Delta t_{9-11} = 12,104.$$

Тогда после корректировки

$$t_{7-8} = 7,208; \quad t_{8-9} = 7,896; \quad t_{9-11} = 7,896.$$

Скорректированное число ресурсов составит:

$$R_{7-8} = 13,873; \quad R_{8-9} = 15,198; \quad R_{9-11} = 15,198.$$

Суммарный прирост ресурсов 46,269.

Графический способ (с помощью прямой CD) даст приближенное решение:

$$\Delta t_{7-8} = 3; \quad \Delta t_{8-9} = 2; \quad \Delta t_{9-11} = 12.$$

При этом скорректированное число ресурсов:

$$R_{7-8} = 14,285; \quad R_{8-9} = 15; \quad R_{9-11} = 15.$$

Суммарный прирост ресурсов составит 16,285, что практически совпадает с точным решением (16,269).

Любое другое решение по сжатию критического пути представленного фрагмента графика будет неоптимальным по критерию минимизации суммарного прироста ресурсов.

Пусть $\Delta t_{7-8} = 2; \Delta t_{8-9} = 2; \Delta t_{9-11} = 13$.

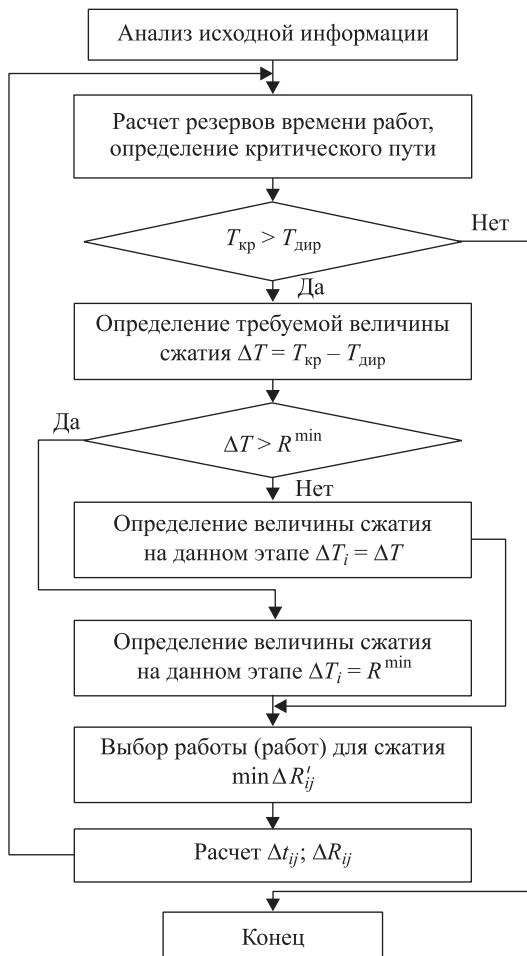
Тогда $t_{7-8} = 8; t_{8-9} = 8; t_{9-11} = 7$.

Скорректированное число ресурсов составит:

$$R_{7-8} = 12,5; R_{8-9} = 15; R_{9-11} = 17,143.$$

Суммарный прирост ресурсов 16,643.

Следует отметить, что требуемая величина сокращения критического пути цепочки работ определяется минимальным значением общего резерва времени графика. После сокращения (сжатия) графика на величину минимального значения общего резерва времени производится перерасчет графика с повторным определением работ критического пути.



очевидно, что в этом случае цепочка работ единственного критического пути трансформируется в дальнейшем в критическую сеть, для оптимизации «сжатия» которой должны быть использованы соответствующие подходы и методы [1, 3, 5, 21]. Требуемые ресурсы перераспределяются с некритических работ или могут быть привлечены извне.

Изложенный метод представлен соответствующим алгоритмом (рис. 7) и программой в среде MS Excel. В ходе ее реализации в первую очередь сокращаются работы, обеспечивающие минимальный прирост числа ресурсов при единичном сокращении продолжительности (максимальное сокращение продолжительности работы при единичном приросте ресурса) [13].

Рис. 7. Алгоритм «сжатия» цепочки критических работ календарного графика

Выводы. 1. В условиях значительного превышения фактических сроков реализации проектов над плановыми сроками задача сокращения календар-

ного графика («сжатие») является весьма актуальной. Существующие методы и модели такого сжатия сети используют в основном методы линейного программирования и потоковые алгоритмы, применение которых вследствие требования целочисленности ограничено. Кроме того, нелинейный характер изменения числа привлекаемых ресурсов при изменении продолжительности работы усложняет задачу.

2. Для первого этапа оптимизации, когда существует единственный критический путь, состоящий из цепи критических работ, предложен способ выбора приоритетных работ и расчета величины сокращения их продолжительности. Он основывается на решении системы уравнений для поиска значений, в которых скорость изменения числа привлекаемых ресурсов при единичном сокращении продолжительности соответствующих работ критического пути одинакова.

3. Для выбора приоритетных работ и определения величины их сокращения предлагается и графоаналитический подход, реализуемый непосредственно на соответствующих графиках изменения скорости прироста ресурсов в зависимости от величины «сжатия» и обеспечивающий приближенное решение.

4. На основе предлагаемых подходов реализован соответствующий алгоритм и программа в среде MS Excel. Они позволяют устанавливать приоритетные работы единственного критического пути для его сокращения и рассчитывать оптимальные значения такого «сжатия» для каждой работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А в д е е в Ю.А. Выработка и анализ плановых решений в сложных проектах. М.: Экономика, 1971. 96 с.
2. Б а р к а л о в П.С., Б у р к о в а И.В., Г л а г о л е в А.В., К о л п а ч е в В.Н. Задачи распределения ресурсов в управления проектами. М.: ИПУ РАН, 2002. 65 с.
3. К л ы к о в М.С., Д е м е н е в а Е.А. Выбор вариантов интенсифицирования строительства малых водопропускных сооружений железной дороги // Архитектура и строительство России. 2012. № 3. С. 2–12.
4. М а й н и к а Э. Алгоритмы оптимизации на сетях и графах. М.: Мир, 1981. 326 с.
5. М а л ы ш е в Б.С. Двойственный сетевой график // Проблемы разработки и внедрения АСУ на машиностроительных предприятиях. Новосибирск, 1972. 164 с.
6. М а л ь ц е в Ю.А. Экономико-математические методы проектирования транспортных сооружений. М.: Академия, 2010. 320 с.
7. E l m a b r o u k O m a r M. Scheduling Project Crashing Time using Linear Programming Technique. Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Istanbul, Turkey, July 3 – 6, 2012.
8. M u b a r a k S a l e h. Construction Project Scheduling and Control Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2010. 437 p.
9. K o l i s h R., H a r t m a n n S. Heuristic algorithms for the resource-constrained project scheduling problem: classification and computational analysis. Project Scheduling-Recent Models, Algorithms and Applications. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999. Pp. 147–178.
10. N a j i b G., N a b i l S., R i z k J. Crash: an automated tool for schedule crashing. International Journal of Science and Technology. 2014. Vol. 3. No. 2. Pp. 374 – 394.
11. P e r e r a S. Linear Programming Solution to Network Compression // Journal of the Construction Division. Proceedings of the ASCE. 1980. Vol. 106. No. 3. Pp. 315–316.

12. Selingier S. Construction Planning for Linear Projects // Journal of the Construction Division, Proceedings of the ASCE. 1980. Vol. 106. No. C02. Pp. 195–205.
13. Калугин Ю.Б. Организация строительства железных дорог. СПб.: ВТУ ЖДВ, 2004. 320 с.
14. Калугин Ю.Б. Универсальный метод оценки сроков выполнения проекта с вероятностными временными параметрами // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 1. С. 51–59.
15. Калугин Ю.Б. Календарное планирование работ с вероятностными временными параметрами в иерархических структурах // Изв. вузов. Строительство. 2012. № 10. С. 30–39.
16. Калугин Ю.Б., Жарый Д.А. Особенности оптимизации календарных графиков с вероятностными временными параметрами // Изв. вузов. Строительство. 2015. № 3. С. 34–45.
17. Haga Wayne A., O'keefe Tim. Crashing PERT networks: a simulation approach. Paper presented at the 4th International conference of the Academy of Business and Administrative Sciences Conference Quebec City, Canada July 12–14, 2001.
18. Coskun O. Optimal probabilistic compression of PERT networks // J. Construct. Eng. Management. 1984. Vol. 110. Pp. 437–446.
19. Handa V.K., Barcia R.M. Linear Scheduling Using Optimal Control Theory // Journal of Construction Engineering. 1986. Vol. 112. No. 3. Pp. 387–393.
20. Paulson B.C., Chan W.T., Koo Ch.C. Construction Operations Simulation by Microcomputer // Journal of Construction Engineering and Management. 1987. Vol. 113. No. 2. Pp. 302–314.
21. Sahu K., Sahu M. Cost & Time and Also Minimum Project Duration Using Alternative Method. International Review of Applied Engineering Research. 2014. Vol. 4. No. 5. Pp. 403–412.

Калугин Юрий Борисович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: Yuri_Kalugin@inbox.ru
Военный институт железнодорожных войск и военных сообщений, г. Санкт-Петербург

Тупицын Руслан Юрьевич, подполковник; E-mail: typisin77@mail.ru
Военный институт железнодорожных войск и военных сообщений, г. Санкт-Петербург

Получено 19.01.17

Kalugin Yuriy Borisovich, DSc, Professor; E-mail: Yuri_Kalugin@inbox.ru
Military Institute of Rail Transport Troops and Military Communications, St. Petersburg, Russia

Tupitsyn Ruslan Yur'evich, Lieutenant colonel; E-mail: typisin77@mail.ru
Military Institute of Rail Transport Troops and Military Communications, St. Petersburg, Russia

CHOICE OF ACTIVITIES FOR CRASHING THE CRITICAL PATH OF THE NETWORK SCHEDULE

The method of the choice of priority activities for the initial stage of optimization of the network schedule for the nonlinear nature of change of duration of performance of work from quantity of resources is stated. The activities providing the «crashing» are defined by the minimum growth rate of number of the attracted resources at unit reduction of duration of activity. Realization of the offered approaches will allow to define the activities which are subject to optimization at a stage of planning, to calculate the size of reduction of their duration and number of the attracted resources.

Key words: scheduling and project management, critical path method, optimization of schedules on time.

REFERENCES

1. Avdeev Yu.A. Vyrabotka i analiz planovykh resheniy v slozhnykh proektakh [Development and the analysis of planned decisions in complex projects]. Moscow, Economy, 1971. 96 p. (in Russian)
2. Barkalov P.S., Burkova I.V., Glagolev A.V., Kolpachev V.N. Zadachi raspredeleniya resursov v upravlenii proektami [Problems of distribution of resources in project management]. Moscow, IPU RAN, 2002. 65 p. (in Russian)
3. Klykov M.S., Demeneva E.A. Vybor variantov intensifitsirovaniya stroitel'stva malykh vodopropusknykh sooruzheniy zheleznoy dorogi [Choice of options of an intensification of construction of small artificial constructions of the railroad]. Architektura i stroitel'stvo Rossii [Architecture and construction of Russia]. 2012. No. 3. Pp. 2–12 (in Russian)
4. Maynica E. Algoritmy optimizatsii na setyakh i grafakh [Optimizations algorithms for networks and graphs]. Moscow, Mir, 1981. 326 p. (in Russian)
5. Malyshev B.S. Dvoystvennyy setevoy grafik [Dual network schedule]. Problemy razrabotki i vnedreniya ASU na mashinostroitel'nykh predpriyatiyakh [Problems of development and deployment of ACS at machine-building enterprises]. Novosibirsk, 1972. 164 p. (in Russian)
6. Mal'tsev Yu.A. Economiko-matematicheskie metody proektirovaniya transportnykh sooruzheniy [Economic-mathematical methods of design of transport objects]. Moscow, Academia, 2010. 320 p. (in Russian)
7. Elmabrouk Oмар M. Scheduling Project Crashing Time using Linear Programming Technique. Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Istanbul, Turkey, July 3 – 6, 2012.
8. Mubarak Saleh. Construction Project Scheduling and Control Second Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2010. 437 p.
9. Kolish R., Hartmann S. Heuristic algorithms for the resource-constrained project scheduling problem: classification and computational analysis. Project Scheduling-Recent Models, Algorithms and Applications. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999. Pp. 147–178.
10. Najib G., Nabil S., Rizk J. Crash: an automated tool for schedule crashing. International Journal of Science and Technology. 2014. Vol. 3. No 2. Pp. 374–394.
11. Perera S. Linear Programming Solution to Network Compression. Journal of the Construction Division. Proceedings of the ASCE. 1980. Vol. 106. No. 3. Pp. 315–316.
12. Selinger S. Construction Planning for Linear Projects. Journal of the Construction Division, Proceedings of the ASCE. 1980. Vol. 106. No. C02. Pp. 195–205.
13. Kalugin Yu.B. Organizatsiya stroitel'stva zheleznykh dorog [Organization of construction of the railroads]. St. Petersburg, 2004. 320 p. (in Russian)
14. Kalugin Yu.B. Universal'nyy metod otsenki srokov vypolneniya proekta s veroyatnostnymi vremenennymi parametrami [Universal method of computing finish time for networks with imprecise durations]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No. 1. Pp. 51–59 (in Russian)
15. Kalugin Yu.B. Kalendarnoe planirovanie rabot s veroyatnostnymi vremenennymi parametrami v ierarkhicheskikh strukturakh [Planning of works with probabilistic temporary parameters in hierarchical structures]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2012. No. 10. Pp. 30–39 (in Russian)

16. Kalugin Yu.B., Zharyy D.A. Osobennosti optimizatsii kalendarnykh grafikov s veroyatnostnymi vremennymi parametrami [Features of optimization of networks with imprecise durations]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2015. No 3. Pp. 34–45 (in Russian)
 17. Haga Wayne A., O'keefe Tim. Crashing PERT networks: a simulation approach. Paper presented at the 4th International conference of the Academy of Business and Administrative Sciences Conference Quebec City, Canada July 12–14, 2001.
 18. Coskun O. Optimal probabilistic compression of PERT networks. J. Construct. Eng. Management. 1984. Vol. 110. Pp. 437–446.
 19. Handa V.K., Barcia R.M. Linear Scheduling Using Optimal Control Theory. Journal of Construction Engineering. 1986. Vol. 112. No. 3. Pp. 387–393.
 20. Paulson B.C., Chan W.T., Koo Ch.C. Construction Operations Simulation by Microcomputer. Journal of Construction Engineering and Management. 1987. Vol. 113. No. 2. Pp. 302–314.
 21. Sahu K., Sahu M. Cost & Time and Also Minimum Project Duration Using Alternative Method. International Review of Applied Engineering Research. 2014. Vol. 4. No. 5. Pp. 403–412.
-

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 2. КОНДЕНСАЦИОННО-АБСОРБЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕПЛОМАССООБМЕНА И КОМПЛЕКСНОЙ ПЫЛЕГАЗООЧИСТКИ В ФОРСУНОЧНЫХ АППАРАТАХ

Приведена уточненная система уравнений математической модели комплексной конденсационно-абсорбционной очистки промышленных газовых выбросов от субмикронной пыли и вредных газовых компонентов. Приведены параметры численной реализации модели для процесса тепломассообмена, реализующегося в оросительных камерах кондиционеров воздуха (КВ), для процессов конденсационного пылеулавливания в полых форсуночных скрубберах (ПФС) и скрубберах Вентури (СВ), а также сопоставление результатов расчетов с известными опытными данными. Установлено, что наиболее эффективная конденсационная пылеочистка достигается для наиболее мелких частиц пыли и наиболее низких их концентраций на входе в газоочистители.

Ключевые слова: форсуночные скруббера, пенные аппараты, многоступенчатая пыле- и газоочистка.

Введение. В форсуночных аппаратах (оросительных камерах СКВ, камерах тепловлажностной обработки воздуха систем вентиляции, газоочистителях – полых форсуночных скрубберах, скрубберах Вентури, барботажных аппаратах (пенных аппаратах (ПА), центробежно-барботажных аппаратах (ЦБА))) осуществляются одновременно процессы теплообмена и массообмена, обеспечивающие параметры воздуха (газов) на выходе из таких устройств, соответствующие нормативным требованиям по его качеству. В рабочих зонах этих аппаратов движется гетерогенная система, состоящая из парогазового потока, капель жидкости (в форсуночных аппаратах) и твердых частиц пыли. При этом парогазовый поток включает в себя пары жидкости (воды) и различные газовые компоненты – сухой воздух, CO_2 , CO , H_2S , C_2H_4 , SO_2 , NO_x и др. Назначение вышеназванных аппаратов как газоочистителей –

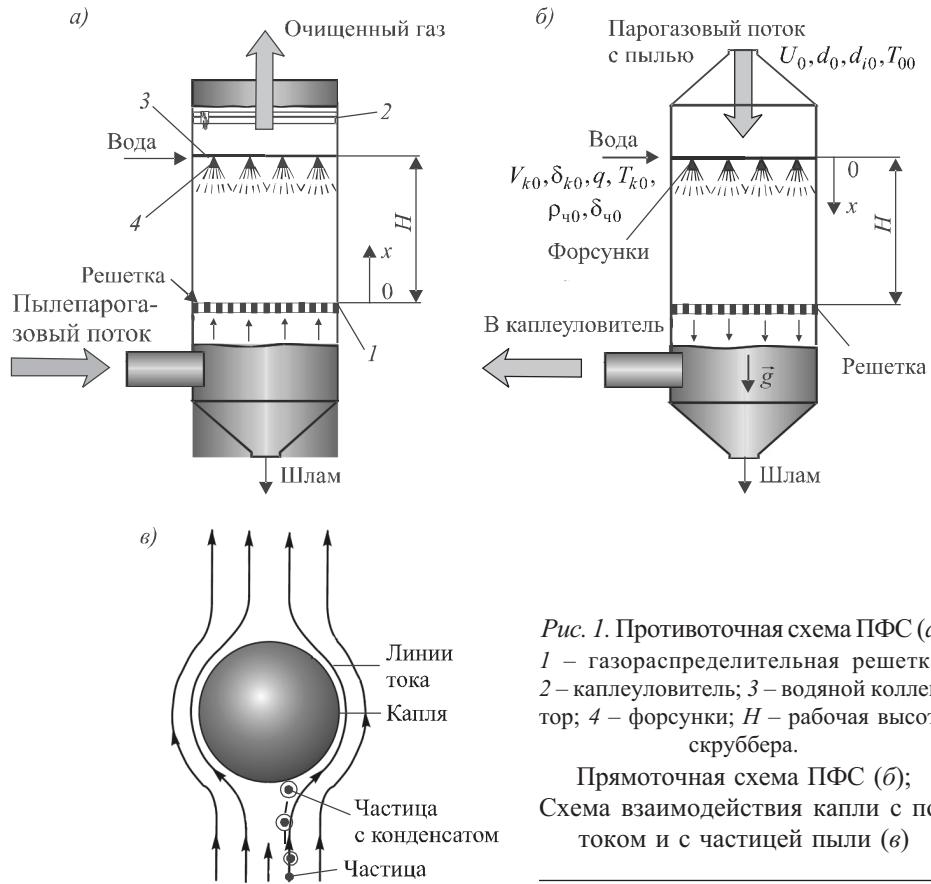


Рис. 1. Противоточная схема ПФС (а);
1 – газораспределительная решетка; 2 – каплеуловитель; 3 – водяной коллектор; 4 – форсунки; H – рабочая высота скруббера.

Прямоточная схема ПФС (б);
Схема взаимодействия капли с потоком и с частицей пыли (в)

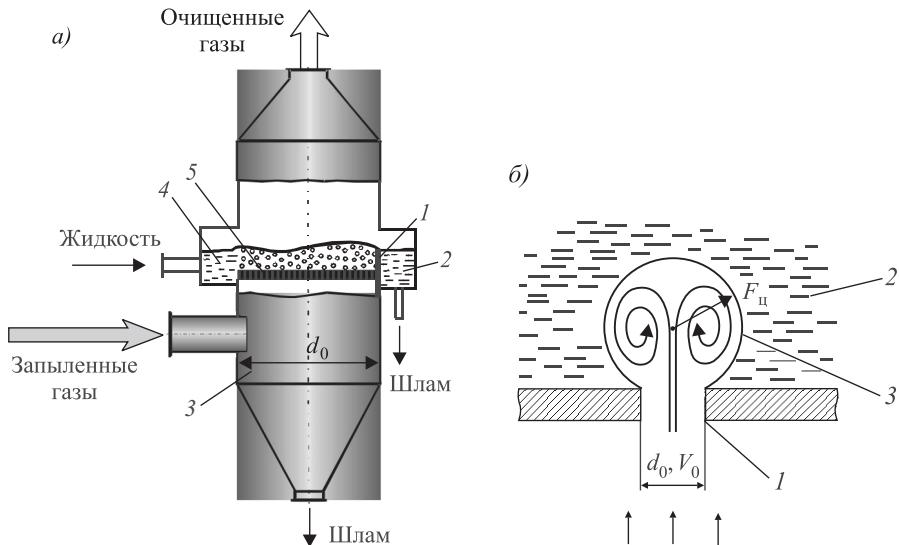


Рис. 2. Схема ПА с переливной перфорированной тарелкой (а)

1 – порог; 2 – сливная коробка; 3 – корпус; 4 – приемная коробка; 5 – тарелка.

Схема выделения частиц из потока в парогазовом пузырьке, формирующемся на отверстии тарелки ПА (б)

d_0 – диаметр отверстия газораспределительной решетки; 1 – отверстие в решетке; 2 – вода; 3 – парогазовый пузырь

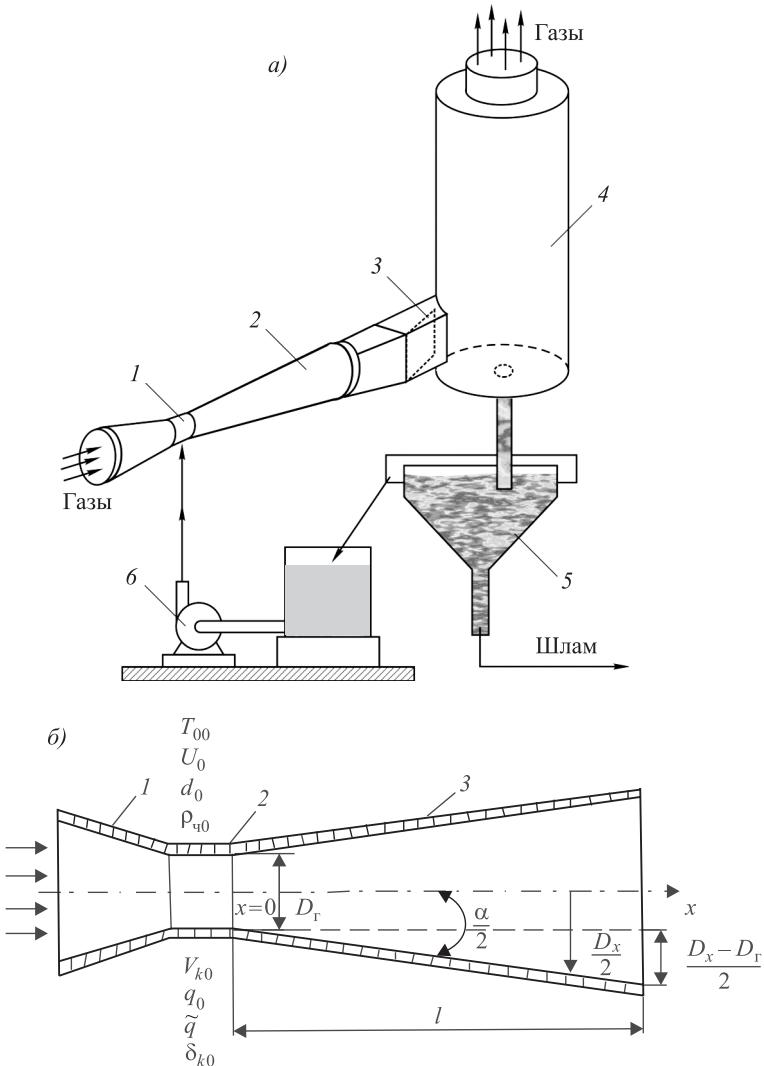


Рис. 3. Пиз-Антони – Вентури скруббер (а)

1 – устройство для подачи орошающей воды в горловину трубы; 2 – труба Вентури; 3 – регулирующая заслонка; 4 – каплеуловитель; 5 – резервуар-отстойник для шламовой жидкости; 6 – насос.

Схема трубы Вентури СВ (б)

1 – конфузор; 2 – горловина; 3 – диффузор; D_x , α – текущий диаметр и угол раствора диффузорной части трубы; D_r – диаметр горловины трубы; T_{00} , U_0 , d_0 – температура, скорость, влаго-содержание парогазового потока в горловине трубы; V_{k0} , T_{k0} , δ_{k0} , \tilde{q} – скорость, температура, размер капель, коэффициент орошения в горловине трубы

уловить частицы пыли на капли жидкости (форсуночные аппараты), на промывную воду на газораспределительных решетках (барботажные аппараты) и абсорбировать на воду (или специально подобранный водный раствор) вредные газовые компоненты. Этот процесс пыле- и газоочистки может быть в этих аппаратах осуществлен комплексно и одновременно. Схемы ПФС, СВ, ПА, ЦБА приведены на рис. 1–4.

Постановка задачи. Общая система уравнений для такого неизотермического гетерогенного потока в форсуночных аппаратах с определен-

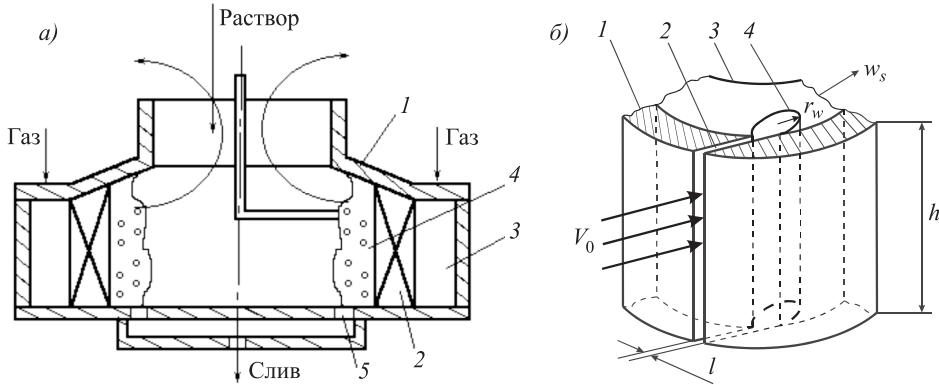


Рис. 4. Схема центробежно-барботажного аппарата (а)

1 – корпус; 2 – направляющий аппарат (авиатор); 3 – коллектор подвода газа; 4 – центробежно-барботажный слой; 5 – отверстия отвода жидкости.

Схема формирования паровоздушного цилиндрического пузыря на отверстии газораспределительной решетки ЦБА (б)

1 – завихритель; 2 – тангенциальное щелевое отверстие; 3 – центробежно-барботажный слой; 4 – цилиндрический пузырь

ными допущениями сформулирована в [1]. Там же даны обоснования сделанным допущениям. Основные из них: капли распыливаемой жидкости монодисперсны с диаметром, равным массмедианному (по расчету форсунок); концентрации капель невелики и в силу этого их коалесценцией пренебрегается.

Эта система с некоторыми уточнениями имеет вид:

– уравнение движения капли среднемассового размера

$$\frac{d\vec{V}_k}{dt} = \vec{R}_k + \vec{g} - \frac{\vec{V}_k}{m_k} \frac{dm_k}{dt}, \quad \vec{R}_k = \tilde{\xi} \frac{\vec{U} - \vec{V}_k}{\tau_k}; \quad (1)$$

– уравнение теплообмена капли с парогазовым потоком

$$c_{ik} m_k \frac{dT_k}{dt} = -\alpha_k \pi \delta_k^2 (T_{ks} - T) + \sum_i r_i \frac{dm_{ki}}{dt} + \sum_j c_j \rho_j \frac{\pi \delta_k^2}{4} (T_j - T_0) n_{Stk_j}; \quad (2)$$

– уравнение теплообмена «образования» j -й фракции частиц с парогазовым потоком

$$c_j m_j \frac{dT_j}{dt} = -\alpha_j \pi \delta_j^2 (T_j - T) + \sum_i r_i \frac{dm_{ji}}{dt}; \quad (3)$$

– уравнение теплообмена парогазового потока с каплями и «образованиями»

$$\rho \frac{d(c(T - T_0))}{dt} = \alpha_k \pi \delta_k^2 (T_k - T_0) n_k + \sum_j \alpha_j \pi \delta_j^2 (T_j - T) n_j; \quad (4)$$

– уравнение массообмена капли с i -м компонентом парогазового потока

$$\frac{dm_{ki}}{dt} = -\beta_{ki} \pi \delta_k^2 (\rho_{ki} - \rho_i); \quad (5)$$

– уравнение массообмена «образования» j -й фракции частиц с i -м компонентом парогазового потока

$$\frac{dm_{ji}}{dt} = -\beta_{ji}\pi\delta_j^2(\rho_{ji} - \rho_i); \quad (6)$$

– скорость изменения массы капли за счет поглощения ею «образований» j -й фракции частиц

$$\frac{dm_{kj}}{dt} = \rho_j \frac{\pi\delta_k^2}{4} V_c \eta_{Stk_j}; \quad (7)$$

– общая скорость изменения массы капли за счет растворения в ней i -х компонентов парогазового потока и поглощения j -х «образований»

$$\frac{dm_k}{dt} = \sum_i \frac{dm_{ki}}{dt} + \sum_j \frac{dm_{kj}}{dt}; \quad (8)$$

– общая скорость изменения массы j -го «образования» за счет растворения в его конденсате i -х компонентов парогазового потока

$$\frac{dm_j}{dt} = \sum_i \frac{dm_{ji}}{dt}; \quad (9)$$

– уравнение неразрывности для диспергированной жидкости

$$\frac{\partial \rho_k}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_k \vec{V}_k) = \frac{dm_k}{dt} n_k; \quad (10)$$

– уравнение неразрывности для i -х компонентов парогазового потока

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_i \vec{U}) = - \sum_j \frac{dm_{ji}}{dt} n_j - \frac{dm_{ki}}{dt} n_k; \quad (11)$$

– уравнение неразрывности для нереагирующей компоненты парогазового потока

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_g \vec{U}) = 0; \quad (12)$$

– уравнение неразрывности для j -х «образований»

$$\frac{\partial \rho_j}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_j \vec{U}) = - \sum_i \frac{dm_{ji}}{dt} n_j - \rho_j \frac{\pi\delta_k^2}{4} V_c \eta_{Stk_j} n_j; \quad (13)$$

– уравнение неразрывности для сухих частиц j -й фракции

$$\frac{\partial \rho_{rj}}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_{rj} \vec{U}) = -\rho_{rj} V_c \eta_{Stk_j}; \quad (14)$$

– уравнения фазового равновесия на поверхностях капель и «образований» для i -х компонентов парогазового потока (закон Генри):

$$P_{ki} = m_{px,i}(T_k) x_{ki}, \quad (15)$$

$$P_{ji} = m_{px,i}(T_j)x_{ji}; \quad (16)$$

– парциальное давление насыщенных водяных паров на границе раздела фаз задается по формуле (10.2.4) [1];

– барометрическое давление (закон Дальтона)

$$B = \sum P_i; \quad (17)$$

– плотность парогазовой смеси

$$\rho = \sum_i \rho_i; \quad (18)$$

– теплоемкость парогазовой смеси

$$c\rho = \sum_i c_i \rho_i; \quad (19)$$

– уравнения состояния компонентов парогазовой смеси

$$\rho_i = \frac{P_i M_i}{RT}; \quad (20)$$

– связь мольной концентрации растворенного i -го компонента парогазовой смеси в капле и конденсате j -го «образования» с массовой

$$(x_{k,j})_i = \frac{(c_{mi})_{k,j}}{M_i} \left/ \frac{(c_{mi})_{k,j}}{M_i} + \frac{1}{M_p} \right.; \quad (21)$$

– уравнение для скорости изменения массовой концентрации растворенного i -го компонента в капле и конденсате j -го образования

$$\frac{d(c_{mi})_{k,j}}{dt} = \frac{(dm_i)_{k,j}}{dt} \frac{6}{\pi \delta_{k,j}^3 \rho_{\infty}}; \quad (22)$$

– эквивалентный сферический объем конденсата j -го «образования»

$$\delta_{j3} = \sqrt[3]{\frac{6m_j^c}{\pi \rho_{\infty}}} + \delta_{j0}^3; \quad (23)$$

– скорость изменения массы конденсата на j -м «образовании»

$$\frac{dm_j^c}{dt} = \sum_i \frac{dm_{ji}}{dt}; \quad (24)$$

– размер капли

$$\delta_k = \sqrt[3]{\frac{6m_k}{\pi \rho_{\infty}}}; \quad (25)$$

– тепловой эффект абсорбции – десорбции компонентов парогазовой смеси

$$r_i = \frac{RT^2}{M_i} \frac{d \ln m_{px,i}}{dt}; \quad (26)$$

– тепловой эффект испарения – конденсации воды на линии насыщения (аппроксимация опытных данных до 427 °C) в зависимости от температуры можно приближенно принять $r = 2500 \text{ кДж/кг}$:

$$r = (2548 - T_{ks}^{0,5627} e^{0,006119T_{ks}}); \quad (27)$$

– теплоемкость водяного пара в зависимости от температуры (аппроксимация опытных данных до 427 °C), кДж/кг · °C:

$$c_1 = \frac{T}{155}(1 + e^{0,045(T - 590)}); \quad (28)$$

– теплоемкость сухого воздуха в зависимости от температуры (аппроксимация опытных данных до 1400 °C), кДж/кг · °C:

$$c_2(T) = 1,8024 \cdot 10^{-4} T + 0,9511; \quad (29)$$

– относительный коэффициент сопротивления капли

$$\tilde{\xi} = \frac{\xi_k}{\xi_{kc}} = 1 + 0,197 \text{Re}_k^{0,63} + 2,6 \cdot 10^{-4} \text{Re}_k^{1,38}, \quad \text{Re}_k = 0,1-3 \cdot 10^5; \quad (30)$$

– число Рейнольдса обтекания капли

$$\text{Re}_k = \frac{V_c \delta_k \rho}{\mu}, \quad V_c = \left| \vec{V}_k - \vec{U} \right|; \quad (31)$$

– стоксовский коэффициент сопротивления капли

$$\xi_{kc} = \frac{24}{\text{Re}_k}; \quad (32)$$

– счетные концентрации капель и «образований»

$$n_k = \frac{\rho_k}{m_k}, \quad n_j = \frac{\rho_j}{m_j}; \quad (33)$$

– число Нуссельта для теплообмена капли (по Дрейку)

$$\text{Nu}_k = \frac{\alpha_k \delta_k}{\lambda} = 2 + 0,459 \text{Re}_k^{0,55} \text{Pr}^{0,33}, \quad \text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda}; \quad (34)$$

– число Нуссельта для массообмена капли (по Фресслингу со стефановской поправкой на повышенную концентрацию пара в потоке K_c)

$$\text{Nu}'_{ki} = \frac{\beta_{ki} \delta_k}{D_i} = 2(1 + 0,276 \text{Re}_k^{0,5} \text{Sc}_i^{0,33}) K_c, \quad \text{Sc}_i = \frac{\mu}{\rho D_i}; \quad (35)$$

$$K_c = 1 + \frac{P_{nk} + P_n}{2B}; \quad (36)$$

– коэффициент захвата «образований» каплями по Ленгмюру – Блоджетту с поправкой на зацепление Н.А. Фукса

$$\eta_{\text{Stk}_j} = \left(\frac{\text{Stk}_j}{\text{Stk}_j + 0,5} \right)^2 + 2,5 \frac{\delta_j}{\delta_k}, \quad \text{Stk}_j = \frac{\rho_\infty \delta_j^2 V_c}{18 \mu \delta_k}; \quad (37)$$

– коэффициенты теплообмена и массообмена для «образований» в силу малости их размеров принимаются равными:

$$\text{Nu}_j = \frac{\alpha_j \delta_j}{\lambda} = 2, \quad \text{Nu}'_j = \frac{\beta_{ji} \delta_j}{D_j} = 2; \quad (38)$$

– коэффициенты динамической вязкости и теплопроводности много-компонентной парогазовой смеси принимаются по формулам Уилки, коэффициент диффузии i -го компонента в парогазовой смеси – равным коэффициенту диффузии этого компонента в нереагирующей его компоненте по формуле

$$D_i = D_{i0} \frac{B_0}{B} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1.75}, \quad B_0 = 0,1 \text{ МПа}, \quad T_0 = 273 \text{ К}. \quad (39)$$

Уравнение движения парогазовой смеси не рассматривается. Полагается, что трение потока о стенки аппаратов мало по сравнению с инерционными эффектами, и тогда скорость парогазового потока в одномерной стационарной постановке определяется из уравнения неразрывности (12) при малости концентраций капель и частиц в виде

$$U = U_0 \frac{\rho_{g0}}{\rho_g} \frac{S_0}{S}, \quad (40)$$

где индексом 0 обозначены входные параметры.

Уравнение (40) частично учитывает двумерность за счет силы тяжести, действующей на капли, увеличивающей их концентрацию в нижней части горизонтальных камер и меняющей термодинамическую обстановку вокруг них по высоте камеры за счет изменений температуры T и влагосодержания d . Изменение скорости за счет профиля камеры (скруббер Вентури) учитывается отношением площади поперечного сечения рабочей части аппарата S к входной S_0 .

В силу малости размеров и концентраций частиц и абсорбируемых газов в потоке в уравнениях комплексной модели полагалась физическая плотность капель и «образований», равная плотности диспергируемой жидкости, а также c_k и c_j равными c_∞ .

Эффективность конденсационного улавливания пыли η_π и абсорбирования газовых компонентов на воду η_i определяется по отношениям их массовых расходов на выходе и на входе в аппараты по уравнениям:

$$\eta_\pi = 1 - \frac{(\rho_q US)_{\text{вых}}}{(\rho_q US)_{\text{вх}}}, \quad \eta_i = 1 - \frac{(\rho_{cB} d_i US)_{\text{вых}}}{(\rho_{cB} d_i US)_{\text{вх}}}, \quad (41)$$

$$\rho_q = \sum_j \rho_{qj}. \quad (42)$$

В системе уравнений (1–42) приняты следующие обозначения:
 \vec{V}_k, \vec{U} – вектора скоростей капли диаметром δ_k и парогазового потока;
 \vec{R}_k – вектор силы аэродинамического сопротивления капли, приходящейся на единицу ее массы;
 \vec{g} – вектор ускорения силы тяжести;

m_k – масса капли, переменная величина за счет процессов массообмена;
 $\tau_k = \rho_m \delta_k / 18\mu$ – время динамической релаксации капли;
 ρ_m – плотность капли;
 μ – динамическая вязкость парогазового потока, можно принять как для сухого воздуха в зависимости от температуры;
 $c_{ж}$ – удельная теплоемкость жидкости (воды);
 T_k – среднемассовая абсолютная температура капель;
 α_k – коэффициент теплоотдачи капли;
 T_{ks} – температура поверхности капли, можно принять $T_{ks} = T_k$;
 T – абсолютная температура парогазового потока;
 r_i – удельная теплота фазового перехода i -го компонента;
 dm_{ki} / dt – скорость изменения массы капли во времени за счет фазового перехода i -го компонента;
 c_j – удельная теплоемкость «образования» – частица пыли с конденсатом на поверхности, можно принять $c_j = c_{ж}$;
 ρ_j – массовая концентрация j -го «образования» в потоке;
 T_j – абсолютная температура j -го «образования»;
 η_{Stk} – коэффициент захвата каплей j -го «образования», вычисляется по формуле Ленгмюра–Блоджетта с поправкой Н.А. Фукса;
 m_j – масса j -го «образования»;
 α_j – коэффициент теплоотдачи j -го «образования»;
 dm_{ji} / dt – скорость изменения массы j -го «образования» за счет массообмена с i -м компонентом парогазового потока;
 ρ – плотность парогазового потока;
 c – удельная теплоемкость парогазового потока;
 n_k – счетная концентрация капель в потоке;
 n_j – счетная концентрация j -х «образований» в потоке;
 δ_j – размер (диаметр) j -го «образования»;
 β_{ki} – коэффициент массоотдачи капли при взаимодействии с i -м компонентом;
 ρ_{ki} – парциальная плотность i -го компонента на поверхности капли в состоянии насыщения, вычисляется по температуре капли;
 ρ_i – парциальная плотность i -го компонента вдали от капли (в потоке);
 β_{ji} – коэффициент массоотдачи j -го «образования» при взаимодействии с i -м компонентом;
 ρ_{ji} – парциальная плотность i -го компонента на поверхности j -го «образования» в состоянии насыщения, вычисляется по температуре «образования»;
 dm_{kj} / dt – скорость изменения массы капли за счет поглощения ею j -го «образования» в столкновительном процессе;
 $V_c = |V_k - U|$ – модуль относительной скорости капель и «образований», полагается, скорость «образований» равна скорости потока U в силу их малости;
 ρ_k – массовая концентрация капель в потоке;
 P_{ki} и P_{ji} – парциальные давления i -х компонентов на поверхностях капель и j -х «образований» в состоянии насыщения;

$m_{px,i}$ – коэффициенты Генри для i -х компонентов – коэффициенты фазового равновесия;

x_{ki} и x_{ji} – мольные концентрации i -х компонентов в растворах капли и конденсата на j -м «образовании» соответственно;

B – барометрическое давление;

P_i – парциальное давление i -го компонента в потоке;

M_i – молекулярная масса i -го компонента;

$R = 8,314 \text{ кДж/кг}$ – универсальная газовая постоянная;

$(c_{mi})_{k,j}$ – массовые концентрации i -го компонента в растворах капли и конденсата на j -м «образовании» соответственно;

M_p – молекулярная масса растворителя (воды);

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости (воды);

δ_{j0} – начальный размер j -го «образования» – размер j -й сухой частицы;

λ и c_p – коэффициент теплопроводности и удельной теплоемкости при постоянном давлении парогазового потока, можно принять как для сухого воздуха.

Численный анализ модели для систем нейтральный газ (воздух, крекинг-газы) – капли воды – пары воды в широких диапазонах влагосодержаний, а также сопоставление результатов расчетов с известными опытными данными для оросительных камер кондиционеров воздуха (КВ) приведены в [2]. Задача решалась в стационарной постановке в Эйлеровых координатах. Границные условия для прямоточных и противоточных камер ставились в соответствии с общими схемами рис. 1–4.

Здесь же остановимся на результатах расчетов для камеры орошения КВ с двухсторонним орошением в соответствии с опытными данными [3]. Результаты сведены в табл. 1 и свидетельствуют о хорошем согласовании теории и опыта.

Таблица 1. Значения параметров воздуха и капель на выходе из камеры орошения

Параметры	Расчет				Опыт
	0,6	0,7	0,8	1,0	
d , кг/кг сух. возд.	0,0077	0,0084	0,007	0,0065	0,0073
T , К	286,7	285,2	283,9	281,8	283,6
T_k , К	279,3	279,5	279,7	280,0	279,9
T_{k0} , К	278,9	278,9	279,0	279,0	

Таблица 2. Сравнение режимных параметров оросительной камеры при исходных данных: $T_{00} = 298,9 \text{ К}$; $d_0 = 10,4 \text{ г/кг сух. возд.}$; $U_0 = 2,67 \text{ м/с}$; $V_{k0} = 15,26 \text{ м/с}$; $\delta_{k0} = 457 \text{ мкм}$

Параметры	Методика ВНИИКондиционер	Модель тепломассообмена					
		q , л/м ³	2,33	2,33	2,1	1,95	1,8
T_{k0} , К	277,86	277,86	277,0	276,0	275,5	275,0	275,0
T , К	284,3	285,05	285,18	285,08	285,36	285,49	285,49
d , г/кг	7,8	7,3	7,3	7,2	7,2	7,2	7,2
T_k , К	280,54	280,12	279,5	278,74	278,42	278,07	278,07

Примечание. T , d , T_k – выходные параметры из камеры орошения температуры воздуха, влагосодержания и температуры капель.

В табл. 2 приведены для сравнения результаты расчетов на основе модели оросительной камеры КВ (с двухсторонним орошением) и с помощью методики ВНИИКондиционер. Как видно из табл. 2, также получено хорошее согласие. При этом установлена возможность оптимизировать процесс обработки воздуха с помощью модели, чего нельзя сделать на основе методики ВНИИКондиционер. Например, для данных условий расчета с помощью модели можно установить входные параметры орошающей воды, снижающие ее расход как минимум на 25 %.

На рис. 5 представлены результаты расчетов конденсационного улавливания сажи из крекинг-газов в ПФС в зависимости от температуры орошающей воды. На рис. 5, а показан рост частиц за счет конденсата, на рис. 5, б

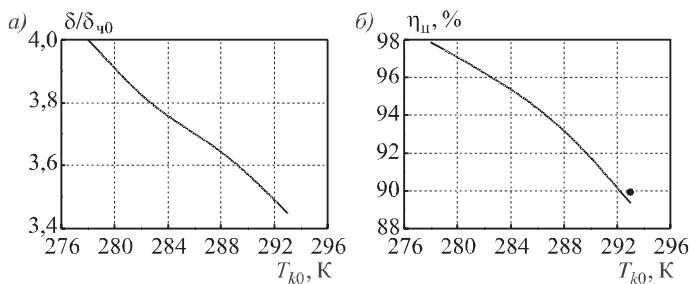


Рис. 5. Результаты расчетов по модели для ПФС

$$H = 12,75 \text{ м}; \tilde{q} = 7,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3; \delta_{k0} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}; V_{k0} = 24,5 \text{ м/с}; \\ T_{00} = 443 \text{ К}; U_0 = 0,25 \text{ м/с}; d_{n0} = 0,93 \text{ кг/кг сух. возд.}; \delta_{q0} = 10^{-7} \text{ м}; \\ \rho_{q0} = 1,72 \text{ г/м}^3$$

эффективность улавливания сажи в зависимости от температуры орошающей воды T_{k0} . Точкой обозначен результат натурного эксперимента В.Н. Ужова, А.Ю. Вальдберга [4], откуда следует хорошее согласие теории и опыта. Кроме того, из расчета видно, что при снижении температуры жидкости эффективность сажеулавливания существенно повышается или при той же эффективности, но при температуре $T_{k0} = 278 \text{ К}$ ($+5^\circ\text{C}$) высота скруббера может быть уменьшена почти втрое.

На рис. 6 приведены результаты расчетов эффективности пылеулавливания в СВ в зависимости от входных концентраций пыли ρ_{q0} и влагосодержания d_0 . С ростом ρ_{q0} эффективность резко падает, с ростом влагосодержания – растет, что подтверждается известными опытами А.Ю. Вальдберга и др.

На рис. 7 представлены расчеты для СВ зависимости эффективности от угла раствора (рис. 7, а) и длины (рис. 7, б) диффузора. Из рис. 7, а

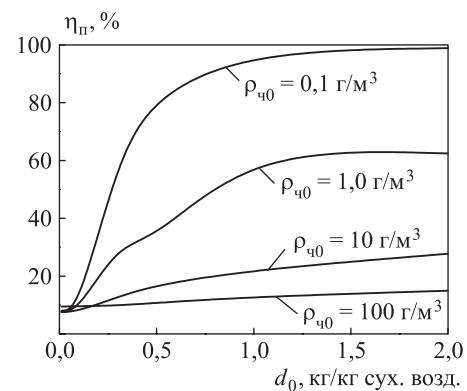


Рис. 6. Влияние влагосодержания на эффективность пылеулавливания в СВ
 $V_{k0} = 5 \text{ м/с}; T_{k0} = 293 \text{ К}; \rho_q^0 = 10^3 \text{ кг/м}^3; \tilde{q} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3; U_0 = 160 \text{ м/с}; T_{00} = 333 \text{ К}; \alpha = 6^\circ; l = 1 \text{ м}; D_r = 0,1 \text{ м}; \delta_{q0} = 10^{-7} \text{ м}$

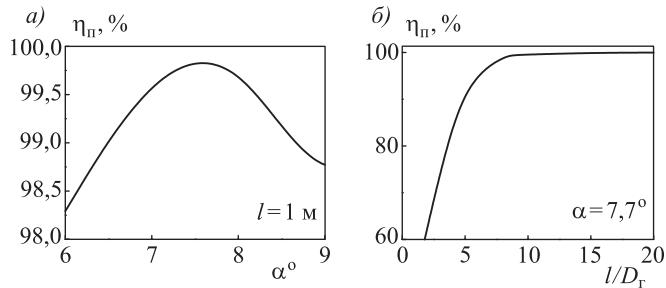


Рис. 7. Влияние угла расширения (а) и длины диффузора (б) СВ на эффективность пылеулавливания

$V_{k0} = 5 \text{ м/с}$; $\Theta_0 = 293 \text{ К}$; $\rho_q^0 = 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\tilde{q} = 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^3$; $U_0 = 80 \text{ м/с}$;
 $T_{00} = 333 \text{ К}$; $\rho_{q0} = 1 \text{ г/м}^3$; $d_0 = 0,5 \text{ кг/кг сух. возд.}$; $D_r = 0,1 \text{ м}$;
 $\delta_{q0} = 10^{-6} \text{ м}$

следует, что оптимальная величина угла α для рассчитанного случая равна $7,7^\circ$, рекомендуемое опытное значение для СВ $\alpha = 6\text{--}7^\circ$. Из рис. 7, б видно, что в данном случае длину диффузора целесообразно ограничить величиной $l/D_r = 10$ (рекомендуемое значение $l/D_r = 10\text{--}15$). При других входных параметрах оптимальная длина диффузора может быть определена расчетом с помощью предложенной модели.

Специальные расчеты также подтверждают, что противоточные схемы форсуночных скрубберов более экономичны, чем прямоточные.

Выводы. Согласно вышеприведенному анализу, установлено, что модель конденсационного пылеулавливания работоспособна и может служить инструментом для расчетов и оптимизации ПФС, СВ, оросительных камер КВ и камер тепловлажностной обработки систем вентиляции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Шиляев М.И. Аэродинамика и тепломассообмен газодисперсных потоков. 2-е изд., испр. и доп. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2015. 288 с.
- Шиляев М.И., Хромова Е.М., Богоомолов А.Р. Интенсификация тепло- массообмена в дисперсных средах при конденсации и испарении. Томск: Изд-во ТГАСУ, 2010. 272 с.
- Тарабанов М.Г., Видин Ю.В., Бойков Г.П. Тепломассоперенос в камерах орошения кондиционеров с форсунками распыления. Красноярск: Крас. ПИ, 1974. 210 с.
- Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. Очистка газов мокрыми фильтрами. М.: Химия, 1972. 247 с.

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 2. CONDENSATION-ABSORPTION MODEL OF HEAT AND MASS TRANSFER AND INTEGRATED GAS TREATMENT DEVICES IN THE NOZZLE

Shows a refined system of equations of mathematical model of complex condensation-absorption treatment of industrial gas emissions from you-submicron dust and harmful gas components. The parameters of the numerical implementation of the model for heat and mass transfer process, realized in the washer air conditioners (AC), for the processes of condensation of dust collecting in the hollow nozzle scrubbers (HNS), and the Venturi scrubber (SV), as well as a comparison of calculation results with the experimental data. It is found that the most efficient condensing dedusting is achieved for the most dust and fine particles of the lowest concentration at the inlet of a scrubber.

Keywords: nozzle scrubbers, bubble machines, multi-dust and gas cleaning.

REFERENCES

1. Shilyaev M.I. Aerodinamika i teplomassoobmen gazodispersnykh potokov. 2-e izd., ispr. i dop. [The aerodynamics and heat and mass transfer of gas-dispersion streams. 2nd ed., rev. and ext.]. Moscow, FORUM: INFRA-M, 2015. 288 p. (in Russian)
2. 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)
3. Tarabanova M.G., Vidin Yu.V., Boykov G.P. Teplomassoperenos v kamerakh orosheniya konditsionerov s forsunkami raspyleniya [Heat and mass transfer in irrigation-ditch Air Conditioning chambers with nozzles spraying]. Krasnoyarsk, Kras. PI, 1974. 210 p. (in Russian)
4. Uzhov V.N., Wal'dberg A.Yu. Ochistka gazov mokryimi fil'trami [Cleaning wet gas filters]. Moscow, Chemistry, 1972. 247 p. (in Russian)

УДК 628.35.001.24

Е.Ю. СОЛОПАНОВ, В.Н. КУЛЬКОВ, Е.В. КУДРЯВЦЕВА,
А.Е. ШИРОКОВ

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
И СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ
ВОЗДУШНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ИММОБИЛИЗОВАННОГО ИЛА
В АЭРОТЕНКЕ**

Подобраны оптимальные параметры по времени и интенсивности регенерации иммобилизованного ила, диаметра регенерационных отверстий при применении воздушной средней пузырчатой регенерации ершовой загрузки. Исследования проводились на физической модели аэротенка-биореактора, представляющей собой вертикальный поперечный разрез коридора промышленного агрегата. Проведена статистическая обработка измерений дозы свободноплавающего ила и показана хорошая сходимость данных эксперимента с нормальным распределением. Получена математическая многопараметрическая модель эффективности регенерации ила и определены оптимальные значения вышеперечисленных параметров. Модель позволяет прогнозировать значение эффективности регенерации в широком интервале изменения параметров. Модель позволила получить геометрический образ поверхности эффективности воздушной регенерации.

К л ю ч е в ы е с л о в а: аэротенк-биореактор, инертная загрузка, иммобилизованный ил, воздушная регенерация загрузки, математическая модель, статистика.

Ершовая синтетическая загрузка предназначена для использования в качестве объемной загрузки для интенсификации работы аэротенка-биореактора с целью увеличения скорости окисления загрязнений и достижения требуемого качества очистки стоков. При использовании дополнительной биомассы ила, размещенной на загрузке, очистка осуществляется несколькими различными ценозами ила: активного ила, находящегося во взвешенном состоянии, и биопленки, прикрепленной к носителям. Иммобилизованный ил менее чувствителен к токсичным веществам, поступающим в аэротенк, и улучшает процесс очистки стоков от трудноокисляемых органических веществ, повышает устойчивость биологических сооружений к залповым сбросам, обеспечивает процесс нитрификации. Инертную загрузку необходимо периодически регенерировать, т.е. удалять с нее иммобилизованный ил, в том числе для предотвращения вторичного загрязнения [1–5].

В работе поставлена задача по оценке эффективности смывания иммобилизованного ила воздушным способом и подбору технологических параметров процесса с построением математической модели эффективности регенерации и статистической обработки экспериментальных данных.

Схема установки с физической моделью биореактора, на которой проводилось изучение воздушной регенерации синтетической инертной загрузки, описана ранее [6, 7]. Общая доза ила в модели аэротенка-биореактора составляла ~0,38 г/л с иловым индексом 110÷140 см³/г. Удельная интенсивность аэрации J водно-иловой смеси поддерживалась ~7 м³/(м² · ч).

Концентрацию свободноплавающего ила $C_{\text{сп}}$ в биореакторе определяли по калибровочному графику [8]. По дозе ила, находящегося в свободноплавающем состоянии до и после регенерации, проводили расчет эффективности регенерации \mathcal{E} иммобилизованного ила

$$\mathcal{E} = \frac{C_{\text{сп}}^{\text{H}} - C_{\text{сп}}^{\text{K}}}{a_{\Sigma} - C_{\text{сп}}^{\text{K}}} \cdot 100 \%,$$

где $C_{\text{сп}}^{\text{K}}$, $C_{\text{сп}}^{\text{H}}$ – концентрация свободноплавающего ила до и после регенерации;

a_{Σ} – общая доза ила в модели, г/л.

Практический интерес представляет зависимость эффективности регенерации ершовой загрузки от времени воздушной среднепузырчатой регенерации, расположенной под загрузкой, интенсивности регенерации и диаметра отверстия на регенераторе.

Эффективность регенерации в диапазоне от 30 с до 2 мин составила $\mathcal{E}_{\min} = 66,4 \%$ и $\mathcal{E}_{\max} = 76,5 \%$, т.е. изменилась на $\sim 10 \%$ при постоянном удельном расходе воздушной регенерации $\sim 7,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (рис. 1). Дальнейшее увеличение времени регенерации до 3 мин и более увеличило эффективность регенерации до 77 %, т.е. на $\sim 1 \%$. Следовательно, продолжительность времени для эффективного удаления иммобилизованного ила с инертной загрузки может быть принята не менее 2 мин.

В исследованном интервале времени полученная зависимость с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9647$ описывается уравнением

$$\mathcal{E} = 6,22 \cdot \ln(t) + 71,05. \quad (1)$$

Постоянно действующая воздушная регенерация ершовой загрузки обеспечивает квазистационарное состояние седиментации и смывания активного ила, не обеспечивая его иммобилизацию на ершах, что исключает положительное влияние инертной загрузки.

Влияние воздушной регенерации загрузки на эффективность удаления иммобилизованного ила изучали в интервале $5–12 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Использование среднепузырчатой регенерации позволило получить максимальную величину эффективности очистки ершовой загрузки при интенсивности воздушной регенерации $J_g = 11,45 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Эффективность регенерации при $J_g = 5,12 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ составила 76 %, а при $J_g = 7,47 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ возросла до 79 % (рис. 2). Увеличение

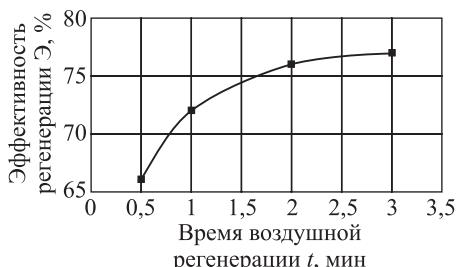


Рис. 1. Зависимость эффективности регенерации иммобилизованного ила от времени воздушной регенерации

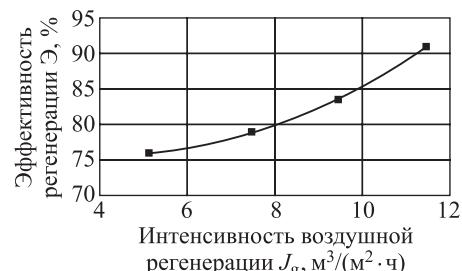


Рис. 2. Зависимость эффективности регенерации иммобилизованного ила от интенсивности воздушной регенерации

эффективности воздушной регенерации ершовой загрузки свыше ~80 % экономически нецелесообразно, так как увеличение интенсивности воздушной регенерации в 1,5 раза (расхода воздуха с 7,47 до 11,45 м³/(м² · ч)) приводит к увеличению эффективности регенерации всего на ~12 % и составляет 91 %.

Найдено уравнение, описывающее эффективность регенерации иммобилизованного ила от интенсивности воздушной регенерации с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9994$:

$$\mathcal{E} = 0,294 \cdot J_g^2 - 2,519 \cdot J_g + 81,243. \quad (2)$$

Определение оптимальных размеров отверстий в количестве 7 штук на трубе воздушного регенератора проводили с использованием найденных оптимальных параметров регенерации: времени – 2 мин и интенсивности – 7,5 м³/(м² · ч).

Минимальный диаметр отверстия d , равный 1 мм (площадь отверстия $F_{\text{отв}} = 0,78 \text{ мм}^2$), позволяет использовать воздушную регенерацию без опасения,

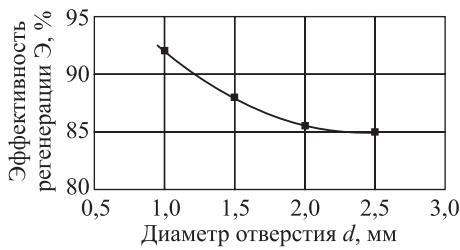


Рис. 3. Зависимость эффективности регенерации иммобилизованного ила от диаметра отверстия воздушного регенератора

что отверстия забываются илом при простое регенератора в несколько часов или дней. Дальнейшее увеличение диаметра отверстий с шагом 0,5 мм показало устойчивое уменьшение эффективности регенерации (рис. 3). Максимальный диаметр отверстия 2,5 мм, использованный нами, увеличил площадь отверстия в 6,3 раза ($F_{\text{отв}} = 4,9 \text{ мм}^2$), что привело к уменьшению эффективности смывания ила с ершей с 92 до 85 %.

Зависимость эффективности регенерации иммобилизованного ила от диаметра отверстия воздушного регенератора описывается уравнением

$$\mathcal{E} = 3,5 \cdot d^2 - 16,95 \cdot d + 105,5 \quad (3)$$

с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9996$.

Уменьшение эффективности воздушной регенерации при увеличении диаметра отверстий объясняется увеличением диаметра пузырей и уменьшением их частоты выхода из отверстий. Серия мелких пузырьков приводит к большему эффекту смывания иммобилизованного ила с ершовой загрузки, чем одиночные крупные пузыри.

Исходя из результатов эксперимента, можно рекомендовать время воздушной регенерации ершовой загрузки 2 мин при интенсивности регенерации ~7,5 м³/(м² · ч) и использовании диаметра отверстия воздушного регенератора 2 мм, что обеспечивает достаточную величину эффективности регенерации синтетической ершовой загрузки приблизительно 85 %.

Для статистической обработки результатов проведен эксперимент, состоящий из 15 измерений интенсивности светового потока, проходящего через слой аэрируемой жидкости с илом в зоне свободной конвекции водо-илового потока, по которой с помощью калибровочного графика

найдена концентрация свободноплавающего ила $C_{\text{сп}}$, находящегося в биореакторе (табл. 1).

Для проверки полученных данных соответствия нормальному закону распределения применили численный метод, основанный на использовании коэффициентов асимметрии и эксцесса [8].

В табл. 2 приведены оценки описательных статистик для концентрации ила, полученные с использованием системы Statistica. Видно, что величины медианы, моды и среднего значения равны между собой. Значения асимметрии и эксцесса приближаются к нулю. Оценки асимметрии и эксцесса по абсолютной величине имеют тот же порядок, что и их ошибки. Следовательно, можно сделать вывод о согласии полученных значений концентрации свободноплавающего ила с гипотезой нормальности.

Таблица 2. Оценки описательных статистик

Переменная	Описательные статистики							
	число опытов	среднее значение	медиана	мода	асимметрия	стандартная ошибка асимметрии	экспесс	стандартная ошибка экспесса
Концентрация свободноплавающего ила	17	0,2613	0,2620	0,2620	-0,1118	0,5497	0,0325	1,063200

Для проверки нормального распределения выборки можно также использовать значения статистик Колмогорова–Смирнова и Шапиро–Уилка совместно с применением визуального метода.

На рис. 4 приведена гистограмма значений концентрации свободноплавающего ила, в заголовке которой указаны рассчитанные значения статистик Колмогорова–Смирнова и Шапиро–Уилка.

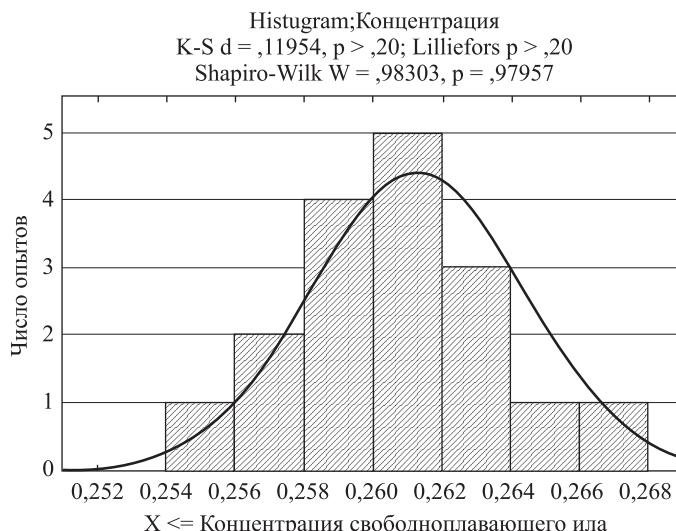


Рис. 4. Гистограмма «Концентрация свободноплавающего ила»

Видно, что критерий Колмогорова–Смирнова близок к нулю, а критерий Шапиро–Уилка приближается к единице, т.е. выполняются условия нормального распределения случайной величины. Из приведенного графика также видно хорошее согласие данных с нормальным распределением.

Таблица 3. Эффективность и технологические параметры регенерации

t , мин	\mathcal{E} , %	J_g , $\text{m}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	\mathcal{E} , %	d , мм	\mathcal{E} , %
0,5	66,0	5,12	76,0	1,0	92,0
1	72,0	7,47	79,0	1,5	88,0
2	76,0	9,45	83,5	2,0	85,5
3	77,0	11,45	91,0	2,5	85,0

$y = a_2 \cdot x_i^2 + a_1 \cdot x_i + a_0$, где a_j – коэффициенты регрессионного уравнения, полученного в результате математической обработки экспериментальных данных ($j = 0, 1, 2$); x_i – один из трех независимых параметров: t , J_g или d . Поэтому уравнение (1) с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9822$ представим в виде

$$\mathcal{E} = -2,60 \cdot t^2 + 13,24 \cdot t + 60,49. \quad (4)$$

Уравнения (2)–(4) были исследованы на экстремумы: производные каждого уравнения приравняли к нулю, т.е. $dy/dx = 0$, и нашли $x_{i\text{opt}}$ экстремума i -го параметра

$$x_{i\text{opt}} = 0,5 \cdot a_1 / a_2. \quad (5)$$

По полученным значениям точек экстремумов рассчитали оптимальную эффективность $\mathcal{E}_{i\text{opt}}$ (табл. 4). Видно, что оптимальная эффективность воздушной регенерации $\mathcal{E}_{i\text{opt}}$ изменяется от 75 до 85 %.

Таблица 4

Номер уравнения	Коэффициенты уравнения			$x_{i\text{opt}}$			$\mathcal{E}_{i\text{opt}}$, %	$\bar{\mathcal{E}}_{i\text{opt}}$, %
	a_0	a_1	a_2	t	J_g	d		
4	60,492	13,239	-2,598	2,548			77,358	
2	81,2443	-2,5194	0,294		4,285		75,846	79,4
3	105,480	-16,950	3,500			2,421	84,960	

Математическую модель составляли на основании уравнений (2)–(4). Получили следующее уравнение гиперповерхности второго порядка:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} = f(t, J_g, d) = & (-0,866 \cdot t^2 + 0,098 \cdot J_g^2 + 1,667 \cdot d^2) + \\ & + (4,413 \cdot t - 0,750647 \cdot J_g - 5,65 \cdot d) + 82,407. \end{aligned} \quad (6)$$

По уравнению (6), используя значения экстремумов, рассчитали оптимальную эффективность $\mathcal{E}_{\text{opt}} = 79,8 \%$, что на 0,5 % отличается от среднеарифметического значения оптимальной эффективности (см. табл. 4).

Полученную модель необходимо проанализировать, так как она устанавливает степень влияния каждого параметра на эффективность при их совме-

стном использовании. Значения оптимальной эффективности регенерации рассчитали по уравнению (6) и сформировали из них матрицу эффективности при заданных значениях констант $J_g = 12,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, $t = 3,5 \text{ мин}$ и $d = 3,0 \text{ мм}$ при изменении третьего параметра.

В табл. 5 приведена одна из матриц эффективности со значениями экспериментальных точек и заданными величинами технологических параметров для прогнозирования, по которым рассчитывались эффективности.

Таблица 5. Матрицы эффективности

№ п/п	Данные			Матрица		
	Ряд 1	Ряд 2	Ряд 3	Ряд 1	Ряд 2	Ряд 3
	$t, \text{мин}$	$J_g, \text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	$d, \text{мм}$	$J_g = 12,5; d = 3,0$	$t = 3,5; d = 3,0$	$t = 3,5; J_g = 12,5$
1	0,5	5,12	1,0	83,0515	79,5935	87,8649
2	1,0	7,47	1,5	84,6085	80,729	86,4983
3	2,0	9,45	2,0	86,4235	82,5258	85,715
4	3,0	11,45	2,5	86,5065	85,1209	85,5151
5	3,5	12,5	3,0	85,8985	85,972	85,8985

Геометрическая интерпретация прогностической матрицы эффективности представлена на рис. 5, где точка соответствует оптимальным входным параметрам $d = 1 \text{ мм}$; $J_g = 12,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; $t = 3,5 \text{ мин}$.

Таким образом, наибольшее влияние на эффективность регенерации загрузки оказывает интенсивность воздушной среднепузырчатой регенерации, равная $J_g = 12,5 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Время воздушной регенерации можно увеличить, но не более чем $t = 3,5 \text{ мин}$. Диаметр отверстий на трубе воздушного регенератора не должен превышать $d = 1 \text{ мм}$.

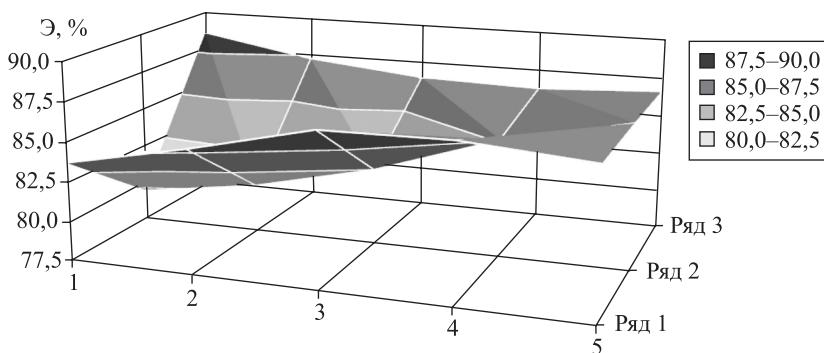


Рис. 5. Геометрическая интерпретация прогностической матрицы эффективности

Использование полученной математической модели позволяет подобрать технологические параметры для воздушной среднепузырчатой регенерации иммобилизованного ила и биологической очистки сточных вод в аэротенке-биореакторе при заданной эффективности регенерации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: АКВАРОС, 2003. 512 с.
2. Khaled Zaher Abdalla, Khaled Khafagy. Upgrading of Activated Sludge Systems Using Immobilized Nitrifiers in Polymer Pellets. International Journal of Scientific & Engineering Research. 2014. Vol. 5. Issue 2. Pp. 619–623.
3. Krikalavova L., Lederer T. A review study of nanofiber technology for wastewater treatment. Nanocon 2011, 3nd International Conf., Czech Republic, Brno, 2011. Pp. 46–51.
4. Куликов Н.И., Райманов А.Я., Омельченко Н.П., Чернышов В.Н. Теоретические основы очистки воды. Макеевка: Ноулидж, Донецкое издание, 2009. 298 с.
5. Швецов В.Н., Морозова К.М., Смирнова И.И., Семенов М.Ю., Лежнев М.Л., Рыжаков Г.Г., Губайдуллин Т.М. Использование блоков биологической загрузки на сооружениях очистки сточных вод // Водоснабжение и сан. техника. 2010. № 10. Ч. 2. С. 25–31.
6. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю., Сосна В.М. Кинетика иммобилизованного и свободноплавающего ила в биореакторе при среднепузырчатой регенерации ершовой загрузки // Изв. вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. Иркутск: ИРНИТУ, 2016. № 2. С. 146–152.
7. Первых И.А., Зеленин А.М., Сосна В.М. Физическое моделирование газогидродинамической обстановки в аэротенке-вытеснителе // Вестн. ИрГТУ. Иркутск: ИрГТУ, 2013. № 7. С. 89–92.
8. Кульков В.Н., Солопанов Е.Ю., Сосна В.М. Оценка достоверности экспериментальных данных для биологической очистки сточных вод с использованием системы Статистика // Вестн. ИрГТУ. Иркутск: ИРНИТУ, 2015. № 6. С. 88–93.

Солопанов Евгений Юрьевич, канд. техн. наук; E-mail: evgursolo@mail.ru
Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)
Кульков Виктор Николаевич, д-р техн. наук, проф.; E-mail: kulkof.viktor@yandex.ru
Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)
Кудрявцева Елена Владимировна, канд. хим. наук, доц.; E-mail: kudriaev@list.ru
Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)
Широков Александр Евгеньевич, асп.
Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)

Получено 13.01.17

Solopanov Eugene Yur'evich, PhD; E-mail: evgursolo@mail.ru
Irkutsk National Research Technical University (INRTU), Russia
Kul'kov Viktor Nikolaevich, PhD, Professor; E-mail: kulkof.viktor@yandex.ru
Irkutsk National Research Technical University (INRTU), Russia
Kudryavtseva Elena Vladimirovna, PhD, Ass. Professor; E-mail: kudriaev@list.ru
Irkutsk National Research Technical University (INRTU), Russia
Shirokov Alexander Evgen'evich, Post-graduate Student
Irkutsk National Research Technical University (INRTU), Russia

MATHEMATICAL MODEL AND STATISTICAL DATA PROCESSING OF IMMOBILIZED SLUDGE AIR REGENERATION IN THE AERATION TANK

Optimal parameters of time and immobilized sludge regeneration intensity, the diameter of the regenerative holes in the application of air medium bubble regeneration brush download

are selected. The studies were conducted on a physical model of the bioreactor-aeration tank, which is a vertical cross-sectional view of an industrial corridor of the industrial unit. Statistical treatment of the measurements the dose of free-floating silt was done and a good agreement of the experimental data with a normal distribution was shown. The mathematical model of multiparametric sludge regeneration efficiency was got and the optimal values of the above parameters were determined. The model predicts the value of the efficiency of regeneration in a wide range of variation of parameters. The model let get a geometric image of the surface of the efficiency of the regeneration air.

Key words: aerotank-bioreactor, inert loading, immobilized sludge, air regeneration of load, mathematical model, statistics.

REFERENCES

1. J m o u r N.S. Tekhnologicheskie i biokhimicheskie protsessy ochistki stochnykh vod na soorusheniyakh s aerotenkami [Technological and biochemical processes of waste water treatment on constructions with aerotanks]. Moscow, AKVAROS, 2003. 512 p. (in Russian)
2. K h a l e d Z a h e r A b d a l l a, K h a l e d K h a f a g y. Upgrading of Activated Sludge Systems Using Immobilized Nitrifiers in Polymer Pellets. International Journal of Scientific & Engineering Research. 2014. Vol. 5. Issue 2. Pp. 619–623.
3. K r i k a l a v o v a L., L e d e r e r T. A review study of nanofiber technology for wastewater treatment. Nanocon 2011, 3nd International Conf., Czech Republic, Brno. 2011. Pp. 46–51.
4. K u l i k o v N.I., R a y m a n o v A.Ya., O m e l ' c h e n k o N.P., C h e r n y s h o v V.N. Teoreticheskie osnovy ochistki vody [Theoretical based water purification]. Makeevka, Nolij, Donetsk branch, 2009. 298 p. (in Russian)
5. S h v e t s o v V.N., M o r o z o v a K.M., S m i r n o v a I.I., S e m e n o v M.Yu., L e z h n e v M.L., R y z h a k o v G.G., G u b a y d u l l i n T.M. Ispol'zovanie blokov biologicheskoy zagruzki na sooruzheniyakh ochistki stochnykh vod [The use of blocks of biological loading on the wastewater treatment plants]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary technique]. 2010. No. 10. P. 2. Pp. 25–31. (in Russian)
6. K u l ' k o v V.N., S o l o p a n o v E.Yu., S o s n a V.M. Kinetika immobilizovannogo i svobodnoplavayushchego ila v bioreaktore pri srednepuzyrchatoy regeneratsii ershovoy zagruzki [Kinetics of immobilized and freely floating sludge in the bioreactor at medium bubble regeneration brush loading]. Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' [Proceedings of the universities. Investments. Building. The property]. Irkutsk, IRNITU, 2016. No. 2. Pp. 146–152. (in Russian)
7. P e r v y k h I.A., Z e l e n i n A.M., S o s n a V.M. Fizicheskoe modelirovaniye gazogidrodinamicheskoy obstanovki v aerotanke vytesniteli [Physical modeling gazogidodynamic conditions in the aeration tank propellant]. Vestnik IrGTU [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. Irkutsk, 2013. No. 7. Pp. 89–92. (in Russian)
8. K u l ' k o v V.N., S o l o p a n o v E.Yu., S o s n a V.M. Otsenka dostovernosti eksperimental'nykh dannykh dlya biologicheskoy ochistki stochnykh vod s ispol'zovaniem sistemy Statistika [Evaluation of reliability of experimental data for the biological purification of waste water using the system statistics]. Vestnik IrGTU [Bulletin of Irkutsk State Technical University]. Irkutsk, IRNITU, 2015. No. 6. Pp. 88–93. (in Russian)

УДК 628.142

Е.М. ГАЛЬПЕРИН

УСЛОВИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ КОЛЬЦЕВОЙ ВОДОПРОВОДНОЙ СЕТИ: ЗАБЛУЖДЕНИЯ И РЕАЛЬНОСТЬ

Кольцевую водопроводную сеть в процессе проектирования и расчета априорно полагают исправной. Проведенные исследования выявили, что априорная исправность кольцевой водопроводной сети является заблуждением. В процессе функционирования водопроводная сеть, имеющая как минимум несколько сот километров трубопроводов, значительное время, а иногда постоянно функционирует неисправной. Существующие нормативы, методические указания и техническая литература это обстоятельство не учитывают. Неадекватность принятой при проектировании модели функционирования водопроводной сети ее реальным условиям работы порождают неэффективные рекомендации по улучшению ее условий эксплуатации. Разработка нормативов и методик, ориентированных на реальные процессы, протекающие в кольцевых водопроводных сетях, является актуальной задачей.

Ключевые слова: кольцевая водопроводная сеть, исправное состояние, неисправное состояние, неадекватность модели, реальные условия функционирования.

Кольцевая водопроводная сеть в процессе расчета и проектирования изначально, умозрительно, без соответствующих исследований считалась исправной. Представление о том, как она работает, в значительной мере является субъективным мнением составителей всевозможных нормативных документов, методических указаний и соответствующей учебной литературы. Это отчетливо проявляется в таком вопросе, как определение условий функционирования водопроводной сети и непосредственно связанной с этим ее надежности.

К надежности подачи воды в настоящее время предъявляются высокие требования. Прекращение подачи воды населению нарушает нормальный уклад их жизни, прерывает налаженный ритм быта, ухудшает санитарно-гигиенические условия проживания. Ответственные и разнообразные функции выполняет водоснабжение на предприятиях. Ущерб от перерыва в подаче воды зависит от характера производства и выражается по-разному. Перерыв в подаче воды отопительным котельным в зимнее время приводит к прекращению подачи тепла в жилые дома и производственные помещения. Это ведет к росту количества заболеваний и затрат в сфере здравоохранения и социального обеспечения, к снижению производительности труда и сокращению производства. Важность надежной подачи воды в период пожаротушения не требует подробного пояснения.

Существенную роль в обеспечении надежности водоснабжения играет система подачи и распределения воды (СПРВ) и ее наиболее ненадежный элемент – водопроводная сеть. Это обстоятельство было известно давно из опыта эксплуатации СПРВ. Умозрительно, на основе опыта, интуиции и

здравого смысла для повышения надежности водопроводной сети было предложено в нормативных документах на проектирование водопроводной сети сооружать ее кольцевой, регламентировать время восстановления трубопровода после аварии. При этом подразумевалось, что эти меры обеспечат достаточную надежность *исправной* водопроводной сети. О том, что водопроводная сеть в основном находится в исправном состоянии, предполагалось априорно и не подвергалось сомнению. На основании этого положения в соответствии с [1] и существующей учебной литературой водопроводная сеть в настоящее время проектируется в предположении, что она находится в исправном состоянии.

Потребности развития техники привели к появлению в середине прошлого века новой научной дисциплины – теории надежности. Появилась новая возможность использовать аппарат теории надежности для повышения надежности водопроводной сети. Была обработана накопленная в течение многих лет статистика отказов трубопроводов водопроводной сети. «Анализ статистических данных показал, что повреждения трубопроводов водопроводных сетей подчиняются пуассоновскому закону распределения случайных событий. Для чугунных трубопроводов среднее время наработка на отказ составляет $1,05 \div 2,18$ года. Для стальных трубопроводов время наработка на отказ составляет $1,09 \div 1,78$ года» [2, с. 19]. Эти данные и аналогичные им позволили, используя аппарат теории систем массового обслуживания, применяемого в теории надежности, определить время нахождения водопроводной сети в исправном (T_0) и в неисправном (T_k , $k = 1, \dots, n$, где k – количество одновременно отключенных участков) состояниях. При этом использовалась марковская модель случайного процесса с дискретными состояниями и непрерывным временем. Исходной является система дифференциальных уравнений А.Н. Колмогорова, в которой в качестве неизвестной величины выступает вероятность нахождения объекта в некотором j -м состоянии. При $t \rightarrow \infty$ $\frac{dP}{dt} = 0$ и из системы дифференциальных уравнений следует система алгебраических уравнений, в которой неизвестными являются так называемые финальные вероятности состояния, что физически может быть представлено как среднее время нахождения объекта в этих состояниях [3]. При значительном числе состояний система уравнений имеет большой порядок, так процесс функционирования водопроводной сети с 20 участками будет описываться системой, содержащей до 10^6 уравнений.

Учитывая невысокую достоверность значений параметров отказов (λ) и восстановления (μ) для каждого конкретного участка, выполнять детальный расчет процесса функционирования водопроводной сети нецелесообразно. С достаточной степенью точности можно принять осредненные величины λ и μ для всех участков водопроводной сети. В такой постановке задачи возможно уменьшение числа уравнений за счет объединения (сворачивания) всех состояний, содержащих k – одновременно выключенных участков, в одно состояние. В этом случае процесс функционирования водопроводной сети сводится к так называемой схеме размножения и гибели. Происхождение этого термина связано с биологическими задачами, в которых такими схемами описываются изменения численности популяции

животных и птиц. Одной из особенностей схемы размножения и гибели является возможность представлять решения в явном виде, которые имеют следующие выражения [4, с. 52]:

при $1 \leq k \leq r$

$$P_k \text{ или } T_k = \frac{n!}{k!(n-k)!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot T_0; \quad (1)$$

при $r \leq k \leq n$

$$P_k \text{ или } T_k = \frac{n!}{r^{k-r} \cdot r!(n-k)!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot T_0; \quad (2)$$

$$P_0 = T_0 = \left[\sum_{k=0}^r \frac{n!}{k!(n-k)!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k + \sum_{k=r+1}^n \frac{n!}{r! \cdot r^{k-r} \cdot (n-k)!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \right]^{-1}. \quad (3)$$

В частности, при $r = 1$ для $1 \leq k \leq n$:

$$P_k \text{ или } T_k = \frac{n!}{(n-k)!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \cdot T_0; \quad (4)$$

$$P_0 \text{ или } T_0 = \left[\sum_{k=0}^n \frac{n!}{(n-k)!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \right]^{-1}, \quad (5)$$

где n – количество ремонтных участков водопроводной сети;

k – количество одновременно отключенных ремонтных участков;

r – количество ремонтных бригад.

Учитывая, что финальные вероятности состояния P_i ($i = 0, 1, \dots, n$) физически определяют время нахождения объекта в этих состояниях, в дальнейшем будем их обозначать через T_i – более принятого обозначения времени.

Была определена чувствительность формул (1)–(5) к разному количеству участков при их постоянной суммарной длине. Параметр потока отказов λ принят равным $1 \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$, параметр потока восстановления $\mu = 365 \frac{1}{\text{год}}$

(время ремонта 1 сут), одна бригада рабочих. Результат расчета водопроводной сети в 50 км при разном количестве участков представлен в табл. 1.

Согласно табл. 1, результаты расчета практически не зависят от количества участков и их размера, а определяются их общей длиной. Следова-

Таблица 1

Количество участков	Средняя длина одного участка ℓ_p , км	$\lambda_i = \lambda \ell_i$ каждого участка, $\frac{1}{\text{год}}$	$\mu, \frac{1}{\text{год}}$	T_0	T_1	T_2
50	1,0	1,0	365	0,863449	0,118281	0,015879
100	0,5	0,5	365	0,863235	0,118251	0,016036
25	2,0	2,0	365	0,863873	0,118338	0,015562
10	5,0	5,0	365	0,865113	0,118508	0,014610

Таблица 2

№ п/п	$\lambda, \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$	$\mu, \frac{1}{\text{год}}$	T_0	T_1	T_2	$T_{\geq 3}$	$T_0 + T_1$
1	0,5	365,0	0,9316	0,0638	0,0043	0,0003	0,9954
2	0,5	182,5	0,8634	0,1183	0,0159	0,0024	0,9817
3	0,5	122,0	0,7961	0,1631	0,0328	0,0080	0,9592
4	1,0	365,0	0,8634	0,1183	0,0159	0,0024	0,9817
5	1,0	182,5	0,7281	0,1995	0,0536	0,0188	0,9276
6	1,0	122,0	0,5956	0,2441	0,0980	0,0623	0,8397
7	2,0	365,0	0,7281	0,1995	0,0536	0,0188	0,9276
8	2,0	182,5	0,4643	0,2544	0,1366	0,1447	0,7187
9	2,0	122,0	0,2314	0,1897	0,1524	0,4265	0,4211

тельно, для получения результатов можно, считая длину одного участка 1 км, их количество численно принимать равным длине всех участков. В табл. 2 выполнен расчет времени пребывания водопроводной сети в 50 км в исправном состоянии T_0 и в состояниях с k одновременно отключенными участками T_k ($k = 1, 2$ и ≥ 3). Такой район водопроводной сети по нормам МЖКХ РФ обслуживает одна бригада рабочих. По сведениям из [5, с. 146] по результатам статистических исследований на ряде водопроводов городов России установлено, что средневзвешенное значение величины отказов стальных и чугунных трубопроводов лежит в пределах от 0,5 до 2,0 $\frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$.

Время восстановления неисправного трубопровода в табл. 2 принято 1, 2 и 3 сут (соответственно $\mu = 365; 182,5; 122$).

Кстати, для T_0 результаты табл. 2 можно получить элементарным расчетом. Например, при $\lambda = 1 \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$ в сети, содержащей 50 км трубопровода, произойдет 50 аварий, при времени восстановления 1 сут, водопроводная сеть будет находиться в исправном состоянии $\frac{365 - 50}{365} = 0,8630$ года.

Из анализа табл. 2 следует:

– при $\lambda = 0,5 \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$ и $\mu = 365 \frac{1}{\text{год}}$, что характерно для передовых водопроводных предприятий страны, водопроводная сеть в 50 км трубопроводов, обслуживаемая одной бригадой рабочих, в исправном состоянии находится $365 \cdot 0,9316 = 340$ сут в течение года, т.е. в среднем перерыв в подаче воды происходит каждые 2 нед. При увеличении параметров потока отказов (λ) и восстановления (μ) перерыв в подаче воды становится чаще, а при $\lambda = 2 \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$ и $\mu = 122 \frac{1}{\text{год}}$ перерыв в подаче воды будет происходить в среднем 5 раз в течение недели;

– уменьшение времени восстановления трубопровода после аварии в n раз равнозначно уменьшению параметра потока отказов (λ) в n раз (см. строки 2 и 4 в табл. 2);

– если обеспечить функционирование водопроводной сети при $\lambda = 0,5 \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$ и времени ремонта трубопровода не более 2 сут или $\lambda = 1 \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$

и времени ремонта не более 1 сут, то потребитель будет нормально обеспечен водой (т.е. $0,98 \div 0,99$ годового периода) при отключении в среднем одного участка длиной 1 км на 50 км функционирующей сети (см. последний столбец в табл. 2).

То, что кольцевая водопроводная сеть значительное время работает в неисправном состоянии, было установлено давно [6], а о том, что разделы СНиП [1], посвященные проектированию водопроводной сети, не соответствуют реальным условиям ее работы, было заявлено еще 20 лет тому назад [7]. Возникает естественный вопрос, как в реальной водопроводной сети, которая значительное время (а иногда постоянно) находится в неисправных состояниях, обеспечивается достаточная надежность подачи воды потребителю? Дело в том, что реальных водопроводных сетей, соответствующих требованиям СНиПа [1], в природе нет. Во всех реальных водопроводных сетях существует избыточность пропускной способности за счет того, что скорость движения воды в трубах значительно меньше той, которая рекомендуется нормативными данными, методическими указаниями и учебной литературой. Это утверждение было подкреплено в [7] гистограммой распределения скоростей в трубах водопровода г. Зеленограда. Подтверждение такого положения содержится в [8], согласно которому «гидравлические расчеты, выполненные на ЭВМ с использованием математической модели для водопроводной сети ряда микрорайонов Москвы, показали наличие низких скоростей движения воды по трубопроводам в течение суток – в основном от 0,01 до 0,2 и реже 0,3 м/с. Расчеты совпадают с данными натурных измерений скоростей. Для магистральной водопроводной сети города также отмечено увеличение количества трубопроводов, работающих со скоростью 0,2–0,5 м/с». Очевидно, такое уменьшение скоростей движения воды в трубах не может произойти из-за снижения ее подачи на 20 %.

Был проведен анализ отключений на водопроводной сети г. Самары $d \geq 400$ мм за 2014 г. Общая длина рассматриваемой сети 325,78 км, за год было выполнено 82 отключения. Сведения о количестве отключений по месяцам, время восстановления каждой неисправности приведены в табл. 3.

Из представленных данных следует, что в 2014 г. рассматриваемая водопроводная сеть 38 % годового периода $\left(\frac{139}{365} = 0,38 \right)$ находилась в неис-

правном состоянии, в некоторые месяцы неисправное состояние длилось более половины месяца (например, в декабре, мае). В 31 случае имело место одновременно два отключения, а в феврале один раз одновременно случилось три отключения. Все эти явления имели место при параметре потока отказов $\lambda = \frac{82}{325,78} = 0,25$, что значительно меньше, чем наблюдается в ряде

Условия функционирования и надежность кольцевой водопроводной сети...

Таблица 3

Месяц года	Количество дней в году		Общее количество неисправностей в месяц	Количество неисправностей в месяц, восстановленных за время (сут)								Количество одновременно 2-х (3-х) неисправностей		
				Сутки										
	в исправном состоянии	в неисправном состоянии		1	2	3	4	5	6	9	12			
I	21	10	8	4	3			1				5		
II	14	14	8	3	1	2	2					6 (1)		
III	25	6	4	2	2							0		
IV	20	10	6	3	2		1					1		
V	15	16	3		2						1	0		
VI	16	14	10	1	8	1						6		
VII	20	11	9	5	4							2		
VIII	14	17	11	6	2		1	1	1			7		
IX	24	6	3		3							0		
X	23	8	5	3	1	1						0		
XI	20	10	6	3	2	1						0		
XII	14	17	9	5	2	1				1		4		
Итого	226	139	82	35	32	6	4	2	1	1	1	31 (1)		

водопроводов городов России, в которых λ лежит в пределах $0,5 \leq \lambda \leq 2 \left(\frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}} \right)$ [5, с. 146].

В работе [9] рассматривается пример разработки электронной модели некоего эталонного города. Общая протяженность водопроводной сети около 800 км, принята величина $\lambda = 2 \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$. В итоге получается 1600

аварий в год, что в среднем составляет 4,38 аварии в сутки, т.е., очевидно, такая сеть в исправном состоянии никогда не будет. К сожалению, как решается эта серьезная проблема, в статье ничего не сказано. Обычная картина: работают с моделью, условия функционирования которой неадекватны работе реального объекта.

Убедиться в том, что водопроводная сеть значительное время, а иногда постоянно пребывает в неисправном состоянии, можно элементарным расчетом, пользуясь простейшими арифметическими операциями. Зная параметр потока отказов $\lambda = \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$ (или «интенсивность отказов» в [10])

и протяженность трубопроводов водопроводной сети, умножением этих параметров получаем количество аварий, произошедших в течение года. Умножая количество аварий на среднее время восстановления одной неисправности, устанавливаем ориентировочно, сколько времени в течение года водопроводная сеть находилась в неисправном состоянии. Например, в г. Уфе водопроводная сеть имеет 1689 км и параметр потока отказов $\lambda = 0,62 \frac{1}{\text{км} \cdot \text{год}}$ [10], итого в течение 2012 г. в городе произошло

$1689 \cdot 0,62 \cong 1047$ аварий или в среднем 2,87 аварии в сутки. Если полагать,

что время восстановления в среднем 24 ч, то очевидно, что в исправном состоянии водопроводная сеть г. Уфы не бывает. Аналогично расчет для г. Иркутска показывает, что за 2013 г. в нем произошло $737,206 \text{ км} \cdot 0,40 = 295$ аварий [10]. При среднем времени восстановления трубопровода 24 ч в неисправном состоянии водопроводная сеть г. Иркутска в 2013 г. была около 81 % годового периода. Любопытно, что при разработке схем водоснабжения этих городов [10] не учитывается то обстоятельство, что в г. Уфе водопроводная сеть исправной не бывает, а в г. Иркутске в неисправном состоянии она находится свыше 80 % годового периода. Пренебрежение таким существенным фактом вызывает сомнение, насколько идентичны проведенные расчеты реальным процессам в сетях.

Расчеты, проведенные для городов Уфа и Иркутск, не отвечают на вопрос, сколько времени в течение года потребитель, расположенный в самом неблагоприятном для водоснабжения месте, будет нормально получать воду, т.е. какова надежность водоподачи, а ведь это важнейший показатель водопроводной сети.

В приказе бывшего Минрегиона РФ № 48 от 2008 г. [11] подобный показатель присутствует, документ прошел регистрацию в Минюсте РФ, но упорно не выполняется на практике.

Неадекватное отражение в нашем сознании условия функционирования водопроводной сети порождает ошибочную диагностику явлений и событий, которые мы наблюдаем в ней в реальных условиях. Соответственно наша реакция на эти явления и события не соответствует существующим условиям и будет неэффективна. В конечном счете это выражается в бесполезной трате десятков миллионов рублей без достижения нужного эффекта.

Примеров тому можно привести множество. Так, например, в Самаре при обеспечении водой застраиваемой площадки так называемого аэродрома ДОСААФ была выполнена и осуществлена схема водоснабжения в точном соответствии с действующим СНиПом. В реальности вода в домах в дневное время выше 3-го этажа не поднималась. Для исправления ситуации были вынуждены всю распределительную сеть заменить на трубы большего диаметра.

Нормативная, методическая и учебная литература, в основу которой положена ошибочная модель функционирования водопроводной сети, не только бесполезная, но и вредная, так как дезориентирует своих пользователей.

Выводы. 1. Водопроводная сеть значительное время и иногда постоянно находится в неисправном состоянии. Это обстоятельство не учитывается в методической, нормативной и учебной литературе по ее проектированию, что в итоге ведет к большим материальным потерям.

2. Следует разработать новые принципы проектирования водопроводной сети, которые учитывали бы фактические условия ее работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 31.13330.2012. Свод правил. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02–84. М., 2012. 123 с.
2. Макагонов В.С. Исследование надежности водопроводных сетей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСИ, 1972. 20 с.

3. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1986. 207 с.
4. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1987. 336 с.
5. Сомов М.А., Журба М.Г. Водоснабжение. Т. 1. Системы забора, подачи и распределения воды: учебник для вузов. М.: АСВ, 2010. 262 с.
6. Гальперин Е.М. Определение надежности функционирования кольцевой водопроводной сети // Водоснабжение и сан. техника. 1989. № 6.
7. Гальперин Е.М. Методика расчета кольцевых СПРВ и соответствующие разделы СНиП 2.04.02–84 не отражают реальность и требования жизни // Водоснабжение и сан. техника. 1996. № 8.
8. Храменков С.В. Принципы обеспечения надежности водопроводной сети в условиях сокращения водопотребления // Водоснабжение и сан. техника. 2003. № 5. Ч. 2.
9. Примин О.Г., Громов Г.Н. Разработка электронной модели систем водоснабжения и водоотведения и ее реализация на примере российского города // Водоснабжение и сан. техника. 2016. № 4.
10. Примин О.Г., Борткевич В.С., Миркис В.И., Кантор Л.И., Винарский С.Л. О разработке схем водоснабжения городов России // Водоснабжение и сан. техника. 2014. № 7.
11. Приказ Министерства регионального развития от 14 апреля 2008 г. № 48 «Об утверждении Методики проведения мониторинга выполнения производственных и инвестиционных программ организаций» [Электронный ресурс].

Гальперин Евгений Моисеевич, канд. техн. наук, проф.;

E-mail: evg-galperin@yandex.ru

Самарский государственный архитектурно-строительный университет

Получено после доработки 16.01.17

Gal'perin Evgeny Moiseevich, PhD, Professor; E-mail: evg-galperin@yandex.ru
Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

OPERATING CONDITIONS AND RELIABILITY RING WATER DISTRIBUTION NETWORK: MISCONCEPTIONS AND REALITY

Ring water distribution network in the process of design and calculation of a priori considered good state. Studies have shown that a priori good state of ring water distribution network is a fallacy. In the process of water distribution network functioning, which has at least a few hundred kilometers of pipelines, significant time and sometimes permanently faulty functioning. The existing regulations, guidelines and technical literature do not consider this circumstance. Inadequate adopted in the design of the model of functioning of water supply her real working conditions give rise to inefficient recommendations for improving its operating conditions. Development of standards and procedures, focused on the real processes taking place in the ring water distribution network is an urgent task.

К e y w o r d s: ring water distribution network, good condition, a fault condition, the inadequacy of the model, the actual operating conditions.

REFERENCES

1. Sp 31.13330.2012. Svod pravil. Vodosnabzhenie. Naruzhnye seti i sooruzheniya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.04.02–84 [BS 31.13330.2012. Set of rules. Water supply. External networks and facilities. Updated version of SNiP 2.04.02–84]. Moscow, 2012. 123 p. (in Russian)

2. Makagov V.S. Issledovanie nadezhnosti vodoprovodnykh setey: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Investigation of reliability of water supply networks: the author's abstract: diss. ... cand. tech. sciences]. Moscow, MISI, 1972. 20 p. (in Russian)
 3. Ventselev E.S. Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya [Research operations: tasks, principles, methodology]. Moscow, Nauka, 1986. 207 p. (in Russian)
 4. Gendenko B.V., Kovalevko I.N. Vvedenie v teoriyu massovogo obsluzhivaniya. 2-e izd., pererab. i dop. [Introduction to the theory of mass service. 2 nd ed., pererab. and additional]. Moscow, Nauka, 1987. 336 p. (in Russian)
 5. Somov M.A., Zhurbina M.G. Vodosnabzhenie. T. 1. Sistemy zabora, podachi i raspredeleniya vody: uchebnik dlya vuzov [Water supply. T. 1. Systems of abstraction, supply and distribution of water: a textbook for universities]. Moscow, ASV, 2010. 262 p. (in Russian)
 6. Galperin E.M. Opredelenie nadezhnosti funktsionirovaniya kol'tsevoy vodoprovodnoy seti [Determination of the reliability of the operation of the annular water supply network]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]. 1989. No. 6 (in Russian)
 7. Galperin E.M. Metodika rascheta kol'tsevykh SPRV i sootvetstvuyushchie razdely SNiP 2.04.02-84 ne otrazhayut real'nost' i trebovaniya zhizni [The procedure for calculating circular WSDS and the corresponding sections of BR 2.04.02-84 do not reflect the reality and requirements of life]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]. 1996. No. 8 (in Russian)
 8. Khramenkov S.V. Printsipy obespecheniya nadezhnosti vodoprovodnoy seti v usloviyakh sokrashcheniya vodopotrebleniya [Principles of ensuring the reliability of the water supply network in the face of a reduction in water consumption]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]. 2003. No. 5, ch. 2 (in Russian)
 9. Primin O.G., Gromov G.N. Razrabotka elektronnoy modeli sistem vodosnabzheniya i vodoobravleniya i ee realizatsiya na primere rossiyskogo goroda [Development of an electronic model of water supply and sanitation systems and its implementation on the example of a Russian city]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]. 2016. No. 4 (in Russian)
 10. Primin O.G., Bortkevich V.S., Mirkis V.I., Kantor L.I., Vinarskiy S.L. O razrabotke skhem vodosnabzheniya gorodov Rossii [On the development of schemes for water supply of Russian cities]. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika [Water supply and sanitary engineering]. 2014. No. 7 (in Russian)
 11. Prikaz Ministerstva regional'nogo razvitiya ot 14 aprelya 2008 g. No. 48 «Ob utverzhdenii metodiki provedeniya monitoringa vypolneniya proizvodstvennykh i investitsionnykh programm organizatsii» [Order of the Ministry of Regional Development of April 14, 2008 No. 48 «On approval of the methodology for monitoring the implementation of production and investment programs of the organization». Elektronnyy resurs [Electronic resource] (in Russian)
-

СТРОИТЕЛЬНЫЕ И ДОРОЖНЫЕ МАШИНЫ



УДК 621.926

И.А. СЕМИКОПЕНКО, В.П. ВОРОНОВ, А.С. ЮРЧЕНКО

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ КЛАССИФИЦИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЕЗИНТЕГРАТОРА

Получено аналитическое выражение, позволяющее определить величину дополнительной потребляемой мощности, связанной с установкой классифицирующего устройства в периферийной части камеры помола дезинтегратора. Представлена расчетная схема для определения потребляемой мощности дезинтегратора в связи с дополнительными нагрузками на приведение во вращательное движение классифицирующего устройства и на дополнительное измельчение материала в зоне между внешним рядом ударных элементов и классифицирующим устройством. Определены моменты инерции одной цилиндрической секции установленного классифицирующего устройства с бронеплитами. Пропускная способность классифицирующего устройства согласована с пропускной способностью загрузочного шнекового питателя.

Ключевые слова: дезинтегратор, мощность, шнековый питатель, классифицирующее устройство, материал.

К недостаткам работы дезинтеграторов относятся незначительное количество соударений частиц материала и отсутствие классификации в периферийной части камеры помола [1]. В связи с этим нами была создана конструкция дезинтегратора, включающая корпус 1, разгрузочный патрубок 2, ударные элементы 3 и вращающееся противоположно внешнему ряду ударных элементов классифицирующее устройство 4 (рис. 1) [2].

При установке в камеру помола дезинтегратора классифицирующего устройства 4, содержащего бронеплиты 5 переменного сечения и перфорированные секции 6, потребуется увеличение мощности, которая расходуется на приведение во вращательное движение классифицирующего устройства 4 с бронеплитами 5 и перфорированными секциями 6 и на дополнительное измельчение и классификацию материала. Поэтому величина искомой мощности будет складываться из слагаемых

$$P = P_1 + P_2, \quad (1)$$

где P_1 – мощность, затрачиваемая на дополнительное измельчение материала в зоне между внешним рядом ударных элементов 3 и классифицирующим устройством 4;

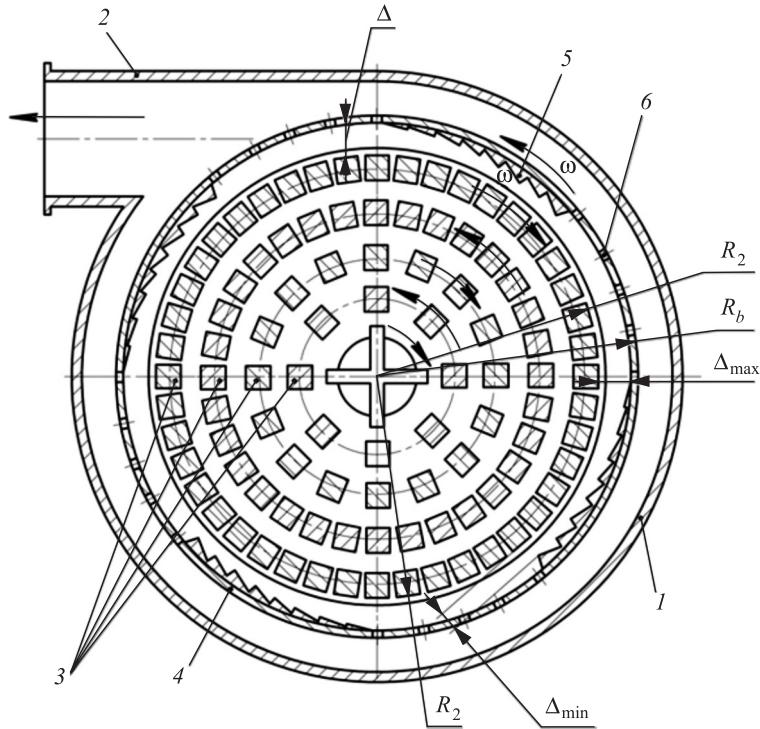


Рис. 1. Дезинтегратор

1 – корпус; 2 – разгрузочный патрубок; 3 – ударные элементы; 4 – классифицирующее устройство; 5 – бронеплиты; 6 – перфорированная секция

P_2 – мощность, которую необходимо затратить на приведение во вращательное движение классифицирующего устройства 4.

Движение частиц материала в зоне между внешним рядом ударных элементов 3 и классифицирующим устройством 4 будет подвергаться интенсивному воздействию касательных напряжений со стороны быстро движущегося слоя частиц вблизи внешнего ряда ударных элементов 3 и со стороны быстро движущегося в обратном направлении классифицирующего устройства 4. Это обстоятельство должно приводить к частичному разрушению частиц материала под действием растягивающих напряжений при прохождении зоны действия классифицирующего устройства 4.

Естественно предположить, что масса материала, поступающая при установленвшемся режиме с внешнего ряда ударных элементов 3 в зону действия классифицирующего устройства 4, равна массе материала, который покидает классифицирующее устройство 4.

За время одного полного оборота T зону дополнительного измельчения и классификации материала покидает объем материала Q_y :

$$Q_y = \frac{S_0 \cdot (R_b - R_2)}{T}, \quad (2)$$

здесь S_0 – общая площадь отверстий перфорированных секций 6 в цилиндрической поверхности классифицирующего устройства 4;

R_b – внешний радиус цилиндрической поверхности классифицирующего устройства 4;

R_2 – наибольший радиус внешнего ряда ударных элементов 3.

Если учесть время одного полного оборота с частотой ротора ω

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (3)$$

то формула (3) принимает вид

$$Q_y = \frac{S_0 \cdot (R_b - R_2) \cdot \omega}{2 \cdot \pi}. \quad (4)$$

Для согласованной работы шнекового питателя (на рис. 1 не показан) и пропускной способности установленного классифицирующего устройства 4 необходимо равенство выражения (4) и производительности шнекового питателя [3]

$$Q_n = \psi \cdot \frac{\pi D_{\text{оп}}^2}{4} \cdot \omega \cdot h, \quad (5)$$

где ψ – коэффициент заполнения площади поперечного сечения шнекового питателя;

$D_{\text{оп}}$ – оптимальный диаметр шнекового питателя;

h – величина шага шнекового питателя.

$$\frac{S_0 \cdot (R_b - R_2) \cdot \omega}{2 \cdot \pi} = \psi \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{оп}}^2}{4} \cdot \omega \cdot h. \quad (6)$$

Полученное соотношение (6) можно рассматривать как уравнение относительно неизвестной величины S_0 . Разрешая (6) относительно S_0 , находим

$$S_0 = \frac{\pi^2}{2} \cdot \psi \cdot \frac{D_{\text{оп}}^2 \cdot h}{R_b - R_2}. \quad (7)$$

Для определения величины касательных напряжений σ в зоне дополнительного измельчения материала воспользуемся результатами работ [4, 5]:

$$\sigma = \frac{\mu \cdot \vartheta}{\Delta}, \quad (8)$$

где μ – коэффициент псевдовязкого измельчения, равный 2618 Па · с;

ϑ – значение окружной скорости частиц материала вблизи поверхности классифицирующего устройства 4;

Δ – величина зазора между радиусом внешнего ряда ударных элементов 3 и поверхностью классифицирующего устройства 4.

Применим соотношение (8) применительно к точкам 1 и 8 на рис. 2, б. В результате имеем:

$$\sigma_{\min} = \frac{\mu \cdot \vartheta_h}{\Delta_{\max}}, \quad (9)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{\mu \cdot \vartheta_k}{\Delta_{\min}}, \quad (10)$$

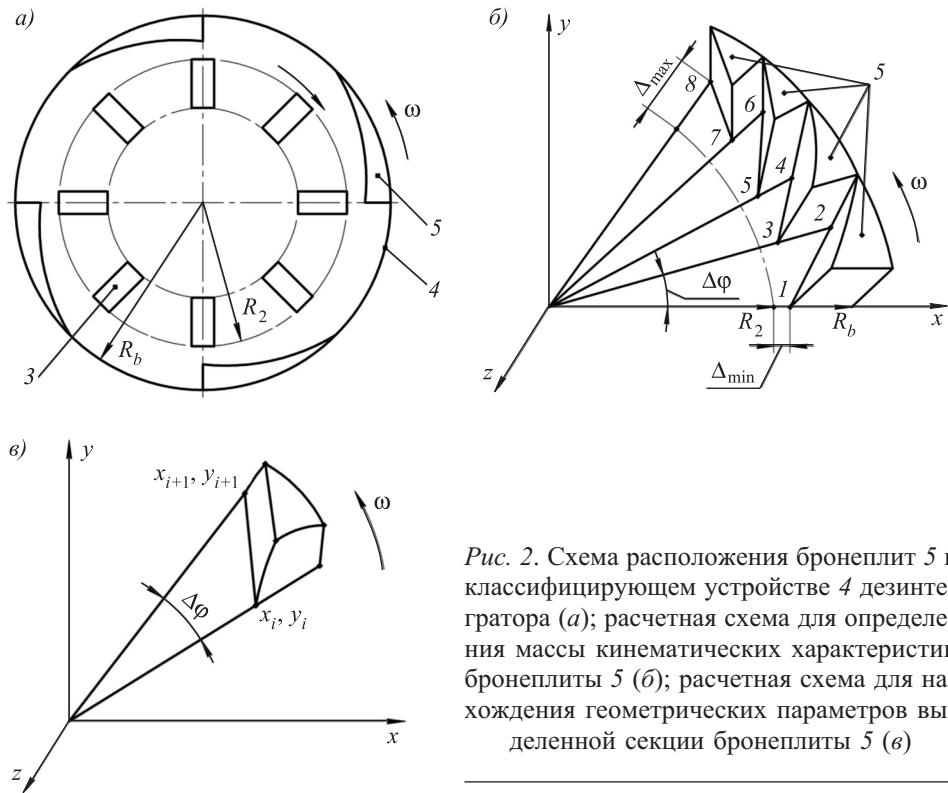


Рис. 2. Схема расположения бронеплит 5 в классифицирующем устройстве 4 дезинтегратора (а); расчетная схема для определения массы кинематических характеристик бронеплиты 5 (б); расчетная схема для нахождения геометрических параметров выделенной секции бронеплиты 5 (в)

где ϑ_h – начальное значение окружной скорости частиц материала вблизи поверхности классифицирующего устройства 4;

ϑ_k – конечное значение окружной скорости частиц материала вблизи поверхности классифицирующего устройства 4;

Δ_{\max} – максимальный зазор между радиусом внешнего ряда ударных элементов 3 и поверхностью классифицирующего устройства 4;

Δ_{\min} – минимальный зазор между радиусом внешнего ряда ударных элементов 3 и поверхностью классифицирующего устройства 4.

Найдем величину мощности, затрачиваемую на дополнительное измельчение в зоне действия классифицирующего устройства 4:

$$P_1 = \Delta E \cdot \omega, \quad (11)$$

где ΔE – изменение кинетической энергии потока частиц материала в зоне действия четырех бронеплит 5 классифицирующего устройства 4.

$$\Delta E = 4 \cdot \Delta E_1, \quad (12)$$

здесь ΔE_1 – изменение кинетической энергии потока частиц материала в зоне действия элементов одной бронеплиты 5 классифицирующего устройства 4:

$$\Delta E = \frac{m}{2} (v_k^2 - \vartheta_h^2), \quad (13)$$

где m – масса частиц материала, находящихся в зоне воздействия элементов бронеплиты 5 классифицирующего устройства 4 в течение времени одного оборота ротора:

$$m = Q_{\text{н}} \cdot \rho \cdot T, \quad (14)$$

где $Q_{\text{н}}$ – объем материала, находящегося в зазоре между внешним рядом ударных элементов 3 и внутренней поверхностью классифицирующего устройства 4;

ρ – плотность частиц материала.

Подстановка (4) и (3) приводит соотношение (3) к следующему виду:

$$m = \frac{\pi^2}{2} \cdot \psi \cdot D_{\text{on}}^2 \cdot h \cdot \rho. \quad (15)$$

На основании полученных соотношений (9), (10) и (15) формула (13) принимает вид:

$$\Delta E_1 = \frac{\pi^2}{4} \psi D_{\text{on}}^2 \cdot h \cdot \rho \cdot \frac{1}{\mu^2} (\sigma_{\max}^2 \Delta_{\min}^2 - \sigma_{\min}^2 \Delta_{\max}^2), \quad (16)$$

где σ_{\max} , σ_{\min} – максимальное и минимальное значения касательного напряжения соответственно.

Подстановка (16) и (12) в (11) приводит окончательно к следующему результату:

$$P_1 = \frac{\pi^2 \psi}{\mu^2} D_{\text{on}}^2 \cdot h \cdot \rho \cdot \omega \cdot (\sigma_{\max}^2 \Delta_{\min}^2 - \sigma_{\min}^2 \Delta_{\max}^2). \quad (17)$$

Таким образом, полученное соотношение (17) определяет величину мощности, затрачиваемую на измельчение материала в зоне действия бронеплит 5 классифицирующего устройства 4.

Для определения мощности, которую необходимо затратить для приведения во вращательное движение классифицирующего устройства 4 с бронеплитами 5 (рис. 2), рассмотрим геометрию бронеплиты 5 и введем систему координат (рис. 2, б). Пусть бронеплита 5 состоит из четырех элементов, имеющих одинаковый угловой размер $\Delta\varphi = \pi/16$ (рис. 2, в). Согласно расчетной схеме, представленной на рис. 2, б, определим координаты точек от 1 до 8, учитывая при этом, что радиальное расстояние от центра вращения роторов до точек с номерами 3, 5, 7 увеличивается на одинаковое расстояние $\Delta = \Delta_{\min} = 0,4$ мм. Поэтому $\Delta_{\max} = 2$ мм. Точки с четными номерами 2, 4, 6, 8 имеют одинаковое расстояние от оси вращения, равное R_b . Следовательно, координаты рассматриваемых точек в двумерной декартовой системе координат xy (рис. 2, б) можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} x_{2n-1} &= (R_2 + \Delta \cdot n) \cos((n-1) \cdot \Delta\varphi); \\ y_{2n-1} &= (R_2 + \Delta \cdot n) \sin((n-1) \cdot \Delta\varphi), \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} x_{2n} &= R_b \cdot \cos(n \cdot \Delta\varphi); \\ y_{2n} &= R_b \cdot \sin(n \cdot \Delta\varphi), \end{aligned} \quad (19)$$

где индекс n принимает следующие значения $n = 1, 2, 3, 4$.

Соединение пар точек (1, 2), (3, 4), (5, 6), (7, 8) представляет собой прямые линии, уравнения которых в декартовой системе координат xy , с угловым коэффициентом будут иметь следующий вид:

$$y_n = K_n X_n + b_n. \quad (20)$$

При переходе к полярной системе координат (r, χ) связь последней с декартовой связана соотношениями:

$$\begin{cases} x = r \cos \chi, \\ y = r \sin \chi. \end{cases} \quad (21)$$

На основании (21) уравнение прямых линий (20) в полярной системе координат примет следующий вид:

$$r_n \sin \chi = K_n \cdot r_n \cdot \cos \chi + b_n. \quad (22)$$

Разрешая (22) относительно величины r_n :

$$r_n = \frac{b_n}{\sin \chi - K_n \cdot \cos \chi}. \quad (23)$$

Для нахождения величины коэффициентов K_n , b_n необходимо воспользоваться соотношениями (18) и (19).

Применив (18) к выражению (20), получим

$$(R_2 + \Delta \cdot n) \cdot \sin((n-1)\Delta\varphi) = K_n (R_2 + \Delta \cdot n) \cdot \cos((n-1)\Delta\varphi) + b_n. \quad (24)$$

В свою очередь применение (19) к (20) приводит к следующему результату:

$$R_b \sin(n \cdot \Delta\varphi) = K_n \cdot R_b \cos(n \cdot \Delta\varphi) + b_4. \quad (25)$$

Полученные выражения (24) и (25) представляют собой систему двух линейных уравнений относительно неизвестных величин K_n , b_n .

Решение данной системы уравнений позволяет получить следующие выражения:

$$K_n = \frac{R_b \cdot \sin(n \cdot \Delta\varphi) - (R_2 + n \cdot \Delta) \cdot \sin((n-1) \cdot \Delta\varphi)}{R_b \cdot \cos(n \cdot \Delta\varphi) - (R_2 + n \cdot \Delta) \cdot \cos((n-1) \cdot \Delta\varphi)}, \quad (26)$$

$$b_n = \frac{R_b \cdot (R_2 + n \cdot \Delta) \cdot \sin(n \cdot \Delta\varphi)}{R_b \cdot \cos(n \cdot \Delta\varphi) - (R_2 + n \cdot \Delta) \cdot \cos((n-1) \cdot \Delta\varphi)}. \quad (27)$$

Величина мощности P_2 , которую необходимо затратить, чтобы привести во вращательное движение установленное в дезинтеграторе классифицирующее устройство 4 с бронеплитами 5, определяется соотношением вида

$$P_2 = E_{\text{вр}} \cdot \omega, \quad (28)$$

где $E_{\text{вр}}$ – кинетическая энергия, которую имеет классифицирующее устройство 4 в результате приведения его во вращательное движение [6]:

$$E_{\text{вр}} = \frac{M_0^2}{2I_0^2}, \quad (29)$$

здесь M_0 – величина момента импульса классифицирующего устройства 4 с бронеплитами 5;

I_0 – момент инерции установленного классифицирующего устройства 4 с бронеплитами 5.

Найдем величину момента импульса

$$M_0 = M_y \cdot \omega \cdot R_b^3, \quad (30)$$

где M_y – масса установленного классифицирующего устройства 4 с бронеплитами 5.

Согласно расчетной схеме, представленной на рис. 2, а, величина момента инерции установленного классифицирующего устройства 4 с бронеплитами 5 определяется соотношением

$$I_0 = 4I_{б.п} + 4I_{ц}, \quad (31)$$

здесь $I_{ц}$ – величина момента инерции одной цилиндрической секции установленного классифицирующего устройства 4 с бронеплитами 5;

$I_{б.п}$ – момент инерции секции бронеплиты 5, равный:

$$I_{б.п} = \sum_{n=1}^4 I_n, \quad (32)$$

где I_n – момент инерции n -го элемента секции бронеплиты 5, величину которого можно найти из следующего выражения [7]:

$$I_n = \rho_m \int_0^z dz \int_{\phi_n}^{\phi_n + \Delta\phi} \left(\int_{r_n}^{R_b} r^3 dr \right) d\chi, \quad (33)$$

где ρ_m – плотность материала, из которого изготовлено установленное классифицирующее устройство 4 с бронеплитами 5:

$$\phi_n = (n-1) \cdot \Delta\phi. \quad (34)$$

Интегрирование соотношения (33) по переменным z и r приводит выражение (33) к следующему виду:

$$I_n = \frac{\rho_m \cdot b}{4} \cdot \left[b_n^4 \int_{\phi_n}^{\phi_n + \Delta\phi} \frac{d\chi}{(\sin\chi - K_n \cdot \cos\chi)^4} - R_b^4 \cdot \Delta\phi \right]. \quad (35)$$

В свою очередь момент инерции одной цилиндрической перфорированной секции 6 классифицирующего устройства 4 равен:

$$I_n = m_{ц} \cdot R_b^2, \quad (36)$$

где $m_{ц}$ – масса одной цилиндрической перфорированной секции 6 классифицирующего устройства 4, величина которой определяется следующим соотношением:

$$m_{ц} = \rho_m \int_0^b dz \int_0^{\pi/4} d\chi \int_{R_b - \Delta R}^{R_b} r dr, \quad (37)$$

здесь ΔR – толщина цилиндрической поверхности установленного классифицирующего устройства 4.

Вычисление интеграла в формуле (37) позволяет получить

$$m_{ц} = \frac{\pi}{8} \rho_m \cdot b \cdot (R_b^2 - (R_b - \Delta R)^2). \quad (38)$$

В силу того факта, что толщина цилиндрической поверхности установленного классифицирующего устройства 4 является малой величиной по сравнению с R_b ($\Delta R \ll R_b$), формулу (38) можно привести к следующему виду:

$$m_{\text{ц}} \cong \frac{\pi}{4} \rho_m \cdot b \cdot R_b \cdot \Delta R. \quad (39)$$

Подстановка (32), (36) с учетом (35), (39) в формулу (31) позволяет получить

$$I_0 = \rho_m \cdot b \left\{ \sum_{n=1}^4 \left(b_n^4 \int_{\varphi_n}^{\varphi_n + \Delta\varphi} \frac{d\chi}{(\sin\chi - K_n \cos\chi)^4} - R_b^4 \cdot \Delta\varphi \right) + \pi \cdot R_b^3 \cdot \Delta R \right\}. \quad (40)$$

Подставив (30) и (40) в (28), получим

$$P_2 = \frac{M_y^2 \cdot R_b^2 \cdot \omega^3}{2\rho_m \cdot b \left\{ \sum_{n=1}^4 \left(\frac{b_n^4}{R_b^4} \cdot \int_{\varphi_n}^{\varphi_n + \Delta\varphi} \frac{d\chi}{(\sin\chi - K_n \cos\chi)^4} - \Delta\varphi \right) + \frac{\pi \Delta R}{R_b} \right\}}. \quad (41)$$

Путем подстановки выражений (17) и (41) в (1) найдем

$$P = \frac{\pi^2 \Psi}{\mu^2} \cdot D_{\text{оп}}^2 \cdot h \cdot \rho \cdot \omega (\sigma_{\max}^2 \Delta_{\min}^2 - \sigma_{\min}^2 \Delta_{\max}^2) + \\ + \frac{M_y^2 \cdot R_b^2 \cdot \omega^3}{2\rho_m \cdot b \left\{ \sum_{n=1}^4 \left(\frac{b_n^4}{R_b^4} \cdot \int_{\varphi_n}^{\varphi_n + \Delta\varphi} \frac{d\chi}{(\sin\chi - K_n \cos\chi)^4} - \Delta\varphi \right) + \frac{\pi \Delta R}{R_b} \right\}}. \quad (42)$$

Таким образом, полученное соотношение (42) определяет величину дополнительной потребляемой мощности, связанной с установкой классифицирующего устройства 4 с бронеплитами 5 в периферийной части камеры помо-ла дезинтегратора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хинт И.А. Основы производства силикальцитных изделий. М.; Л.: Стройиздат, 1962. 636 с.
2. Пат. № 2579491 РФ МПК – 2016.01 B02C 13/22. Дезинтегратор / И.А. Семикопенко, В.С. Богданов, С.В. Вялых, А.А. Жуков, И.О. Трофимов; заявитель и патенто-обладатель БГТУ им. В.Г. Шухова.
3. Пертен Ю.А. Конвейеры: справочник. Л.: Машиностроение, 1984. 367 с.
4. Данилов Р.Г. Механизм тонкого измельчения в роторных мельницах с зубчато-подобным зацеплением // Строит. и дор. машины. 1997. № 12. С. 29–31.
5. Семикопенко И.А., Воронов В.П., Вялых С.В., Гордеев С.И., Жуков А.А. К вопросу об определении касательных напряжений в зоне активного взаимодействия роторов агрегатов дезинтеграторного типа // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2013. № 2. С. 108–109.
6. Кухлинг К. Справочник по физике. М.: Мир, 1985. 520 с.
7. Кузнецова С.И., Рогозин К.И. Справочник по физике. Томск: ТПУ, 2014. 233 с.

Семикопенко Игорь Александрович, канд. техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Воронов Виталий Павлович, канд. физ.-мат. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Юрченко Александр Сергеевич, асп.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено после доработки 19.01.17

Semikopenko Igor' Alexandrovich, PhD, Professor

Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Voronov Vitaliy Pavlovich, PhD, Professor

Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Yurchenko Alexander Sergeevich, Post-graduate Student

Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

CALCULATION OF POWER DEVICES

CLASSIFIES DISINTEGRATOR

In this paper, an analytical expression that indicates the amount of additional power consumption associated with the installation of a classifying device in the peripheral part of the cage mill grinding chamber. It presents the design scheme for the determination of consumption disintegrator power due to additional load on the rotational driving of the classifying device and the additional grinding of the material in the area between the outside next to the drum elements and classifying device. To determine the moment of inertia of a cylindrical section of the classifying device installed with armor plates. The capacity of the classifying device consistent with the capacity of the loading of the screw feeder.

К e y w o r d s: disruptor, power, screw feeder, a classifying device, material.

REFERENCES

1. Hint I.A. Osnovy proizvodstva silikal'tsitnykh izdeliy [Fundamentals of silicalcite products]. Moscow; Leningrad, Stroyizdat, 1962. 636 p. (in Russian)
2. Pat. № 2579491 Russian Federation МИК – 2016.01 B02C 13/22. Dezintegrator [Disintegrator]. I.A. Semikopenko, V.S. Bogdanov, S.V. Vyalykh, A.A. Zhukov, I.O. Trofimov, Appl.... and patentee BSTU after V.G. Shukhov. (in Russian)
3. Pert en Yu.A. Conveyery: spravochnik [Conveyers: handbook]. Leningrad, Mashinostroenie, 1984. 367 p. (in Russian)
4. Danilov R.G. Mekhanizm tonkogo izmel'cheniya v rotornykh mel'nitsakh s zubchato-podobnym zatsepleniem [Mechanism of fine grinding in rotary mills with zubchatopodobnym engagement]. Stroitel'nye i dorozhnye mashiny [Building and road machines]. 1997. No. 12. Pp. 29–31. (in Russian)
5. Semikopenko I.A., Voronov V.P., Vyalykh S.V., Gordeev S.I., Zhukov A.A. K voprosu ob opredelenii kasatel'nykh napryazheniy v zone aktivnogo vzaimodeystviya rotorov agregatov dezintegratornogo tipa [On the determination of shear stresses in the zone of active interaction between the rotor units type Disintegrator]. Vestnik BGTU [Herald BSTU]. 2013. No. 2. Pp. 108–109. (in Russian)
6. Kukhling K. Spravochnik po fizike [Handbook of phisics]. Moscow, Mir, 1985. 520 p. (in Russian)
7. Kuznetsov S.I., Rogozin K.I. Spravochnik po fizike [Handbook of physics]. Tomsk: TPU, 2014. 233 p. (in Russian)

УДК 621.542.001

Е.Ю. ТЮМЕНЦЕВ, Г.Р. ГАВРИЛЬЧИК, М.С. МАЛЫШЕВ,
Т.Р. КВАРЦХАЛАЯ, В.А. ГВОЗДЕВ, Э.А. АБРАМЕНКОВ

**ДРОССЕЛЬНЫЙ ПНЕВМОУДАРНЫЙ МЕХАНИЗМ
С ЧАСТИЧНЫМ ВЫТЕСНЕНИЕМ ВОЗДУХА
ИЗ КАМЕРЫ РАБОЧЕГО ХОДА ПОСРЕДСТВОМ ТРУБКИ
И СТЕРЖНЯ С ВНУТРЕННИМ КАНАЛОМ**

Рассматриваются синтезированные механизмы с дроссельным воздухораспределением и варианты применения признаков-элементов частичного вытеснения в виде трубы и стержня и обсуждаются особенности рабочего процесса с применением его физико-математического описания.

Ключевые слова: стержень, трубка, ударник, площадь сечения, дроссель впуска, камера, синтез, механизм.

Материалы статьи представляют результаты исследования качественных признаков пневмоударных механизмов, синтезированных с применением классификационных признаков механизмов [1, 2]. Работа является продолжением изучения возможностей применения признаков-элементов, в первую очередь, качественной стороны дроссельных пневмоударных механизмов с применением их физико-математического описания.

Цель исследований – установление степени взаимосвязей отдельных пар конструктивных признаков-элементов средств впуска и средств частичного вытеснения воздуха из камеры рабочего хода.

Предмет исследования – качественные свойства взаимовлияния пары признаков: канал частичного вытеснения в стержне; канал частичного вытеснения в трубке.

Синтезированные пневмоударные механизмы с дроссельным воздухораспределением отличаются только парами конструктивного исполнения. Ожидается, что физико-математическое описание рабочего процесса обоих принципиальных схем ДПУМ будет одинаковым. Аналогичны будут их реальные рабочие процессы при равных геометрических параметрах рабочих камер и проходных сечениях воздухопроводящих каналов.

Вариант синтезированного ДПУМ представлен на рис. 1 и снабжен кратким описанием устройства и взаимодействия между признаками-элементами. Синтез осуществлялся с минимальными изменениями базового ДПУМ [3].

Сжатый воздух из сети постоянно по каналам А площадью сечения $\omega_{\text{п}}$, в камеру Б объемом $V_{\text{п}}$ и В площадью сечения ω_x поступает в камеры Г объемом V_p рабочего хода, форсажную непроточную камеру Д объемом $V_{\text{фп}}$ и площадью сечения $\omega_{\text{фп}}$ и камеру Е объемом V_x холостого хода в цилиндре I массой m_k . В зависимости от положения ударника 2 массой m_y со сквозным каналом для пропуска стержня 3 с каналом частичного вытеснения в виде

© Тюменцев Е.Ю., Гаврильчик Г.Р., Малышев М.С., Кварцхалая Т.Р., Гвоздев В.А., Абраменков Э.А., 2017

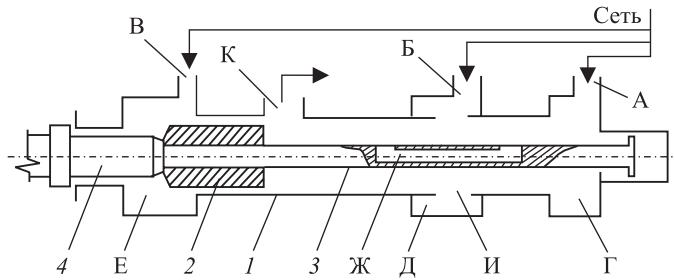


Рис. 1. Принципиальная схема синтезированного ДПУМ

канала Ж площадью сечения ω_B в стержне с выходами на его боковую поверхность на уровне форсажного канала И площадью сечения ω_{ph} часть воздуха из камеры Г перепускается в объем со стороны камеры Е с одновременным его выпуском через канал К площадью сечения $\omega_{Ap} = \omega_{Ax}$. При закрытом канале И воздух из сети в камере Д накапливается, а при открытом канале выпускается в камеру Г, создавая в ней дополнительный импульс давления.

Опорожнение камер Г, Д и Е осуществляется через канал К выпуска.

Под действием разности силовых импульсов давления со стороны камер Г и Е ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по инструменту 4.

Предложенное конструктивное решение ДПУМ позволяет исключить предкамеру; все камеры сообщить с сетью сжатого воздуха, повысив давление воздуха в них; снизить вероятность засорения канала частичного вытеснения воздуха из камеры рабочего хода, понизив давление воздуха в камере рабочего хода в конце холостого хода ударника.

Вариант синтезированного ДПУМ с применением базового [3] представлен на рис. 2 и снабжен кратким описанием устройства и последовательностью протекания рабочего процесса.

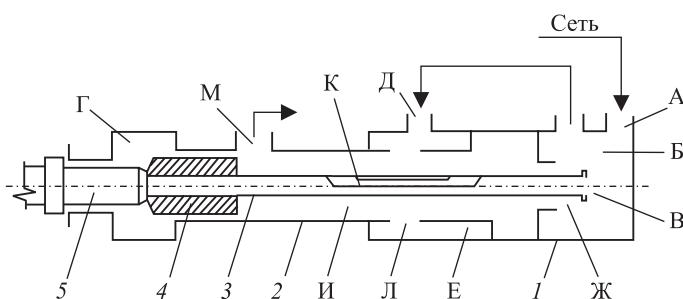


Рис. 2. Принципиальная схема синтезированного ДПУМ

Сжатый воздух из сети постоянно поступает по каналу А площадью сечения ω_n в стакане 1 цилиндра 2 массой m_k в предкамеру Б сетевого воздуха объемом V_n , откуда одновременно по каналу В площадью сечения ω_{xt} в трубке 3 в камеру Г холостого хода объемом V_x , по каналу Д площадью сечения ω_{ph} в форсажную непроточную камеру Е объемом V_{ph} и по кольцевому дроссельному каналу Ж площадью сечения ω_{pr} в камеру И объемом V_p рабочего хода. В зависимости от положения ударника 4 массой m_y со

сквозным каналом для пропуска трубы с каналом частичного вытеснения в виде канала К площадью сечения ω_B в стенке трубы с радиальными выходами на ее боковую поверхность на уровне форсажного канала Л площадью сечения $\omega_{\text{рф}}$ часть воздуха из камеры И перепускается в объем со стороны камеры Г с одновременным его выпуском через канал М выпуска площадью сечения $\omega_{Ap} = \omega_{Ax}$. При закрытом канале Л воздух из сети в камере Е накапливается, а при открытом канале выпускается в камеру И, создавая в ней дополнительный импульс давления.

Опорожнение камер Г, Е и И осуществляется через канал М выпуска.

Под действием разности силовых импульсов давления со стороны камер Г и И ударник совершает возвратно-поступательное движение и периодически наносит удары по инструменту 5.

Предложенное техническое решение ДПУМ позволяет все камеры сообщать с сетью сжатого воздуха только через предкамеру, уменьшив количество воздухоподающих каналов в стенке цилиндра и диаметральный размер цилиндра.

Обозначения, допущения и ограничения к физико-математическому описанию рабочего процесса синтезированных ДПУМ:

$V_n, V_{\text{фр}}, V_x, V_p$ – объемы предкамеры, форсажа, холостого и рабочего хода;

$p_n, p_{\text{фр}}, p_x, p_p$ – давления воздуха в камерах с объемами $V_n, V_{\text{фр}}, V_x, V_p$;

p_c, p_a – давление воздуха в сети и атмосфере;

$\phi_n, \phi_{\text{фр}}, \phi_x, \phi_p$ – коэффициенты бародинамического процесса в камерах с объемами $V_n, V_{\text{фр}}, V_x, V_p$;

$\theta_n, \theta_{\text{фр}}, \theta_x, \theta_p$ – температура воздуха в камерах с объемами $V_n, V_{\text{фр}}, V_x, V_p$;

θ_c, θ_a – температура воздуха в сети и атмосфере;

$\Omega_n, \Omega_{\text{фр}}, \Omega_x, \Omega_p$ – коэффициенты термодинамического процесса в камерах с объемами $V_n, V_{\text{фр}}, V_x, V_p$;

$\omega_n, \omega_{\text{фр}}, \omega_x, \omega_p, \omega_{xt}, \omega_{Ax}, \omega_{Ap}$ – площади геометрических сечений каналов впуска в камеры с объемами $V_n, V_{\text{фр}}, V_x, V_p$ в трубке, выпуска из камеры холостого и рабочего хода;

$\phi_{\text{фр}}, \phi_{xt}, \phi_{Ax}, \phi_{Ap}$ – коэффициенты бародинамического процесса в каналах с геометрическим сечением $\omega_{\text{рф}}, \omega_{xt}, \omega_{Ax}, \omega_{Ap}$;

$\Omega_{\text{рф}}, \Omega_{xt}, \Omega_{Ax}, \Omega_{Ap}$ – коэффициенты термодинамического процесса в каналах с геометрическими сечениями $\omega_{\text{рф}}, \omega_{xt}, \omega_{Ax}, \omega_{Ap}$;

ω_B – площадь геометрического сечения канала частичного вытеснения;

ϕ_B – коэффициент бародинамического процесса для ω_B ;

Ω_B – коэффициент термодинамического процесса для ω_B ;

m_y, m_k – массы ударника и корпуса;

S_y – рабочая площадь кольца торца ударника;

F_h – усилие нажатия на корпус;

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

$(dx_y/dt)_0, (dx_k/dt)_0$ – скорости отскока ударника и корпуса после соударения с хвостовиком и буртиком инструмента;

$(dx_y/dt)_y, (dx_k/dt)_y$ – скорости ударника и корпуса перед соударением с хвостовиком инструмента и корпуса с буртиком инструмента;

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

t, dt – время и его производная.

Допущения: стержень и трубка, пропускаемые через центральное сквозное отверстие, ударник в осевом направлении не перемещается.

Ограничения: для давления воздуха в камерах при прямом и обратных течениях в каналах –

$$\varphi_{ji} \equiv \varphi_{ij} = \begin{cases} p_i \theta_i^{1/2} \cdot 0,29 & \text{при } p_i p_j > 0,5288, \\ p_i \theta_i^{1/2} ((p_i / p_j)^{2/k} - (p_i / p_j)^{k/(k+1)})^{1/2} & \text{при } p_i p_j \leq 0,5288, \\ -p_j \theta_j^{1/2} \cdot 0,29 & \text{при } p_j / p_i > 0,5288, \\ -p_j \theta_j^{1/2} ((p_j / p_i)^{2/k} - (p_j / p_i)^{k/(k+1)})^{1/2} & \text{при } p_j / p_i \leq 0,5288. \end{cases} \quad (1)$$

Ограничения для изменения температуры воздуха в зависимости от изменения ϕ_{ji} и ϕ_{ij} –

$$\Omega_{ji} \equiv \Omega_{ij} = \begin{cases} k - (\theta_i / \theta_j) & \text{при } \varphi_{ij} > 0, \\ k - 1 & \text{при } \varphi_{ij} \leq 0, \\ k - (\theta_j / \theta_i) & \text{при } \varphi_{ji} > 0, \\ k - 1 & \text{при } \varphi_{ji} \leq 0. \end{cases} \quad (2)$$

Ограничения для перемещений ударника и корпуса при $x_y \leq 0$ и $x_k \leq 0$

$$\begin{aligned} (dx_y/dt)_0 &= -k_y(dx_y/dt)_y, \\ (dx_k/dt)_0 &= -k_k(dx_k/dt)_y. \end{aligned} \quad (3)$$

Физико-математическое описание рабочего процесса, синтезированного ДПУМ по рис. 1.

Управление бародинамической составляющей рабочего процесса –

$$dp_{\phi\phi}/dt = k[W(\omega_{\phi\phi}\phi_{\phi\phi} - \omega_{p\phi}(x_y)\phi_{p\phi})]/V_{\phi\phi}, \quad (4)$$

$$dp_x/dt = k[W(\omega_x\phi_x - \omega_{Ax}(x_y)\phi_{Ax}) - p_x(dx_y/dt)S_y]/(V_x + x_yS_y), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} dp_p/dt &= k[W(\omega_p\phi_p + \omega_{p\phi}(x_y)\phi_{p\phi} - \omega_B(x_y)\phi_B - \omega_{Ap}(x_y)\phi_{Ap}) + \\ &+ p_p(d_x/d_t)S_y]/(V_p - x_yS_y). \end{aligned} \quad (6)$$

Ограничения для p_{ij} и p_{ji} для (4) и (7) по (1).

Управление термодинамической составляющей рабочего процесса –

$$d\theta_{\phi\phi}/dt = \theta_{\phi\phi}[W(\omega_{\phi\phi}\phi_{\phi\phi}\Omega_{\phi\phi} - \omega_{p\phi}(x_y)\phi_{p\phi}\Omega_{p\phi})]/p_{\phi\phi}V_{\phi\phi}, \quad (7)$$

$$d\theta_x/dt = \theta_x[W(\omega_x\phi_x\Omega_x - \omega_{Ax}(x_y)\phi_{Ax}\Omega_{Ax}) - (k-1)p_x(dx_y/dt)S_y]/p_x(V_x + x_yS_y), \quad (8)$$

$$\begin{aligned} d\theta_p/dt &= \theta_p[W(\omega_p\phi_p\Omega_p + \omega_{p\phi}(x_y)\phi_{p\phi}\Omega_{p\phi} - \omega_B(x_y)\phi_B\Omega_B - \\ &- \omega_{Ap}(x_y)\phi_{Ap}\Omega_{Ap}) + (k-1)p_p(dx_y/dt)S_y]/(V_p - x_yS_y). \end{aligned} \quad (9)$$

Ограничения для Ω_i и Ω_j для (7)–(9) по (2).

Управление бародинамической составляющей рабочего процесса –

$$d^2x_y/dt^2 = ((p_x - p_p)S_y)/m_y \quad \text{при } x_y > 0, \quad (10)$$

$$d^2x_k/dt^2 = ((p_x - p_p)S_y + F_h)/m_k \quad \text{при } x_k > 0. \quad (11)$$

Ограничения (10), (11) по (3).

Управление бародинамической составляющей рабочего процесса ДПУМ по рис. 2.

$$dp_n/dt = k [W(\omega_n\phi_n - \omega_{\phi p}\phi_{\phi p} - \omega_p\phi_p - \omega_{xt}\phi_{xt})]/V_n, \quad (12)$$

$$dp_{\phi p}/dt = k [W(\omega_{\phi p}\phi_{\phi p} - \omega_{p\phi}(x_y)\phi_{p\phi})]/V_{\phi p}, \quad (13)$$

$$dp_x/dt = k[W(\omega_{xt}\phi_{xt} - \omega_{Ax}(x_y)\phi_{Ax}) - p_x(dx_y/dt)S_y]/(V_x + x_yS_y), \quad (14)$$

$$\begin{aligned} dp_p/dt = k[W(\omega_p\phi_p + \omega_{p\phi}(x_y)\phi_{p\phi} - \omega_B(x_y)\phi_B - \omega_{Ap}(x_y)\phi_{Ap}) + \\ + p_p(dx_y/dt)S_y]/(V_p - x_yS_y). \end{aligned} \quad (15)$$

Ограничения для p_i , p_j для (12) – (15) по (1).

Уравнения термодинамической составляющей рабочего процесса –

$$d\theta_n/dt = \theta_n[W(\omega_n\phi_n\Omega_n - \omega_{\phi p}\phi_{\phi p}\Omega_{\phi p} - \omega_p\phi_p\Omega_p - \omega_{xt}\phi_{xt}\Omega_{xt})]/p_n V_n, \quad (16)$$

$$d\theta_{\phi p}/dt = \theta_{\phi p}[W(\omega_{\phi p}\phi_{\phi p}\Omega_{\phi p} - \omega_{p\phi}(x_y)\phi_{p\phi}\Omega_{p\phi})]/p_{\phi p} V_{\phi p}, \quad (17)$$

$$\begin{aligned} d\theta_x/dt = \theta_x[W(\omega_{xt}\phi_{xt}\Omega_{xt} - \omega_{Ax}(x_y)\phi_{Ax}\Omega_{Ax}) - \\ - (k-1)p_x(dx_y/dt)S_y]/p_x(V_x + x_yS_y), \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} d\theta_p/dt = \theta_x[W(\omega_p\phi_p\Omega_p + \omega_{p\phi}(x_y)\phi_{p\phi}\Omega_{p\phi} - \omega_B(x_y)\phi_B\Omega_B - \\ - \omega_{Ap}(x_y)\phi_{Ap}\Omega_{Ap}) + (k-1)p_p(dx_y/dt)S_y]/p_p(V_p - x_yS_y). \end{aligned} \quad (19)$$

Ограничения для Ω_i , Ω_j для (16)–(19) по (2).

Уравнения бародинамической составляющей рабочего процесса –

$$d^2x_y/dt^2 = ((p_x - p_p)S_y)/m_y \quad \text{при } x_y > 0, \quad (20)$$

$$d^2x_k/dt^2 = ((p_x - p_p)S_y + F_h)/m_k \quad \text{при } x_k > 0. \quad (21)$$

Ограничения для (20), (21) по (3).

Анализ записи уравнений для каналов частичного вытеснения воздуха показывает на их идентичное физико-математическое описание рабочего процесса.

Заметим, что уравнения (10), (11) и (20), (21) при качественном сравнении можно определить без потери информативности, поскольку они подобны по физико-математическому описанию.

Рекомендации по применению признака-элемента в ДПУМ подобны вариантам, представленным на рис. 1 и 2.

Каналы вытеснения будут оказывать одинаковое влияние на рабочий процесс, поскольку конструктивно выполнены коленчатыми с входом и выходом на боковые поверхности стержня и трубы. Однако для одинаковых проходных сечений каналов вытеснения диаметральный размер трубы должен быть увеличен и на участке вытеснения трубка выполняется двухканальной, что усложняет ее конструкцию и изменяет местные сопротивления для канала впуска в камеру холостого хода. Естественно для варианта ДПУМ со стержнем необходимо выполнение канала впуска в камеру холостого хода в стенке цилиндра, что увеличивает его диаметральный размер.

Отметим также, что применение двухканальных трубок может обусловить увеличение диаметральных сечений ударника и цилиндра (корпуса), а выполнение канала частичного вытеснения в стержне потребует выполнения тупикового канала с вскрытием его на боковой поверхности.

Предпочтительное решение о принятии конструкции ДПУМ с трубкой или стержнем будет зависеть от заданных условий эксплуатации машины ударного действия и ее технического обслуживания и текущих ремонтов.

Выводы. 1. Применение коленчатого канала частичного вытеснения в стержне или трубке с выходом и входом на их боковых поверхностях будет зависеть от условий эксплуатации и текущего технического обслуживания ударного действия с ДПУМ по схемам на рис. 1 и 2 и опыта конструктора-создателя машины.

2. Технические решения каналов частичного вытеснения в ДПУМ оказывают существенное влияние на их сложность, технологичность изготовления и обслуживания машины ударного действия с ДПУМ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абраменков Э.А., Абраменков Д.Э. Пневматические механизмы машины ударного действия: справ. пособ. Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1993. 430 с.
2. Кутумов А.А., Абраменков Д.Э., Абраменков Э.А. Навесные пневматические молоты для разработки мерзлых грунтов: монография. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2008. 376 с.
3. Пат. РФ № 2301891. МПК E21C37/00, B25D 9/14. Пневматическое устройство ударного действия с дроссельным воздухораспределением / Д.Э. Абраменков, Э.А. Абраменков, Н.С. Бых, В.А. Емельянов, В.Ю. Ильюченко, М.Н. Ноздренко, Ю.Э. Малышева; заявл. 11.07.2005; опубл. 27.07.2007, Бюл. № 18.

Тюменцев Евгений Юрьевич, студ.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
Гаврильчик Глеб Романович, студ.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
Малышев Максим Сергеевич, инж.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)
Кварцхала Тимур Рамазович, студ.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Гвоздев Владимир Алексеевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: vizo@sibstrin.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

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

E-mail: abramenkovde@sgups.stu.ru

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено 07.10.16

Tumentsev Evgeny Yur'evich, Student

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

Gavril'chik Gleb Romanovich, Student

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

Malyshev Maksim Sergeevich, Engineer

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

Kvartskhala Timur Ramazovich, Student

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

Gvozdev Vladimir Alexeevich, PhD, Ass. Professor; E-mail:vizo@sibstrin.ru

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

Abramenkov Eduard Alexandrovich, DSc, Professor;

E-mail: abramenkovde@sgups.stu.ru

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

THROTTLE PNEUMOSHOCK MECHANISM WITH PARTIAL DISPLACEMENT OF AIR FROM THE CHAMBER OF THE STROKE THROUGH THE TUBE AND THE ROD WITH THE INTERNAL CHANNEL

Considered the mechanisms synthesized with throttle air distribution and application of signs-elements of partial displacement in the form of tube and rod is and discusses the features of the workflow with the application of the physico-mathematical description.

К e y w o r d s: rod, tube, drimmer, cross-sectional area, intake throttle, camera, synthesis, mechanism.

REFERENCES

1. A b r a m e n k o v E.A., A b r a m e n k o v D.E. Pnevmaticheskie mekhanizmy mashiny udarnogo deystviya: sprav. posobie [Pneumatic mechanisms of machines of shock action: throttle, jet, unspool, valveless: reference manual]. Novosibirsk, Publishing house NSU, 1993. 430 p. (in Russian)
2. K u t u m o v A.A., A b r a m e n k o v D.E., A b r a m e n k o v E.A. Navesnye pnevmaticheskie moloty dlya razrabotki merzlykh gruntov: monografiya [Hinged pneumatic hammers for development of frozen soil: monograph]. Novosibirsk, NSUACE (Sibstrin), 2008. 376 p. (in Russian)
3. Pat. RU No. 2301891. IPC E21C 37/00, B25D 9/14. Pnevmaticheskoe ustroystvo udarnogo deystviya s drossel'nym vozdukhораспределением [A pneumatic device of shock action with throttle air distribution]. D.E. Abramenkov, E.A. Abramenkov, N.S. Bykh, V.A. Emel'yanov, V.Yu. Il'yuchenko, M.N. Nozdrenko, Yu.E. Malysheva; appl. 11.07.2005; publ. 27.07.2007, Bull. No. 18 (in Russian)

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ И ЭКОЛОГИИ



УДК 502.211 : 537.531

М.З. АМИРХАНЯН, Ф.Ф. БРЮХАНЬ, А.В. КУЧМИН

НАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ С ЧАСТОТОЙ 50 ГЦ В СОСТАВЕ ИНЖЕНЕРНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗЫСКАНИЙ

Возрастающие с каждым годом объемы потребления электроэнергии, а также повышенное внимание общества на экологические условия среды жизнедеятельности определяют необходимость всестороннего изучения негативных факторов воздействия на человека, в том числе и электромагнитных полей (ЭМП). В частности, исследования ЭМП предусмотрены в строительной деятельности в составе инженерно-экологических изысканий. Однако вопросы измерения ЭМП и обобщения их результатов на предпроектных стадиях строительства проработаны недостаточно и требуют детализации. В статье обосновывается необходимость производства натурных измерений ЭМП в составе инженерных изысканий. Выполнены измерения ЭМП, создаваемых объектами электросетевого хозяйства системы водоснабжения г. Дудинки, и установлена незначительная интенсивность ЭМП. Предложена схема исследований ЭМП для использования в программах инженерно-экологических изысканий.

Ключевые слова: экология, электромагнитное поле, строительство, инженерно-экологические изыскания, электросетевое хозяйство.

Введение. Объемы электроэнергии, потребляемой хозяйствующими субъектами (промышленными, сельскохозяйственными, коммунальными, транспортными предприятиями и др.), а также населением, из года в год возрастают. Несмотря на то обстоятельство, что электроэнергия является одной из наиболее «чистых» видов энергии, с ней связано электромагнитное загрязнение физического пространства, особенно урбанизированных территорий и промышленных зон. Принимая во внимание потенциальную опасность воздействия ЭМП на организм человека [1, 2], а также обеспокоенность людей фактическим или мнимым присутствием ЭМП в местах их нахождения, возникает необходимость систематизированных исследований ЭМП на рабочих местах, в жилой зоне, на территориях промышленных предприятий и вблизи них.

В связи с отмеченными обстоятельствами особое значение представляет исследование территорий намечаемого строительства в рамках инженерно-экологических изысканий. Необходимость таких исследований в строитель-

ной деятельности устанавливается действующими нормативно-техническими документами: сводами правил СП 11-102-97. Инженерно-экологические изыскания для строительства (М.: Госстрой России, 1997) и СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96 (М.: Госстрой РФ, 2012). В этих документах даются лишь самые общие рекомендации по оценке напряженности ЭМП и их опасности. Результаты исследований ЭМП позволяют обеспечить разработку организационных мероприятий и инженерных решений по защите человека от воздействия ЭМП либо принять альтернативное решение о размещении проектируемого объекта. Необходимо отметить, что хотя измерения ЭМП предусматриваются указанными нормативно-техническими документами, во многих случаях ими пренебрегают уже на стадии разработки программ инженерных изысканий.

Несмотря на очевидную актуальность предпроектных исследований ЭМП, вопросы их измерения и обобщения в материалах инженерных изысканий практически не изучены. Можно указать лишь на несколько работ, в которых делалась попытка подобных исследований на территориях объектов электросетевого хозяйства (см., например, [3, 4]).

Настоящая работа посвящена измерению напряженности электрической и магнитной составляющих ЭМП промышленной частоты (50 Гц) при производстве комплексных инженерно-экологических изысканий для реконструкции системы водоснабжения г. Дудинки (Таймырский Долгано-Ненецкий район Красноярского края). Изыскательские работы проводились в сентябре – октябре 2016 г. ООО НПО «Гидротехпроект» с привлечением специалистов НИУ МГСУ и ООО «Экостандарт “Технические решения”».

Согласно имеющейся информации о характеристиках элементов электросетевого хозяйства территории изысканий (их расположения относительно зон жилой застройки, мощностей трансформаторов и передаваемой электроэнергии посредством ЛЭП) было очевидно заранее по данным объектов-аналогов об отсутствии опасности возникновения сильных ЭМП. Тем не менее измерения ЭМП были проведены из соображений устранения беспокойства населения по поводу данного фактора как одного из множества других, влияющих либо способных повлиять на экологическое состояние территории. Наиболее объективно обоснованный ответ на вопрос об опасности или отсутствии опасности ЭМП могут обеспечить лишь результаты натурных измерений ЭМП.

Методика. Измерениям ЭМП предшествовало рекогносцировочное обследование местности, особенностей рельефа и подстилающей поверхности, расположения жилых и промышленных застроек. В процессе рекогносцировочного обследования, а также на основании технической документации было установлено, что наиболее мощные источники ЭМП – главная понизительная подстанция ГПП-6/0,4 кВ, локальная подстанция 6/0,4 кВ действующей насосной станции, здание насосной станции, ЛЭП 6 кВ.

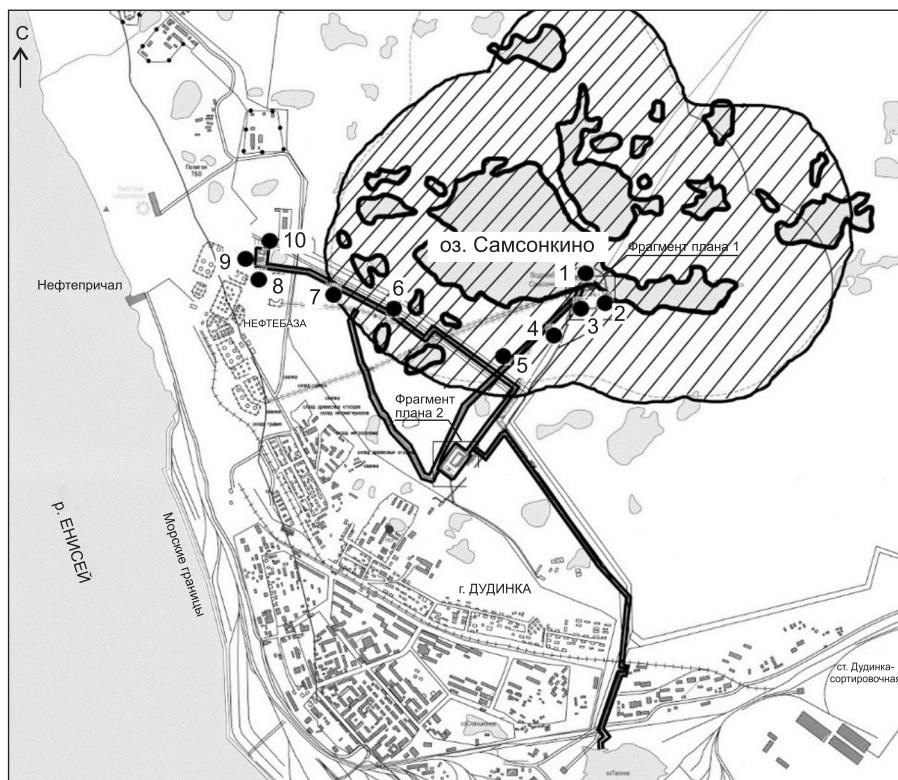
В процессе полевых исследований использовался измеритель компонентов электрического и магнитного полей ВЕ-метр-АТ-003. Такой прибор позволяет измерять электрическую и магнитную составляющие ЭМП в диапазоне частот от 5 Гц до 400 кГц. Диапазон измеряемых величин напряженности электрического поля промышленной частоты изменяется в пределах от

5 до 1000 В/м, магнитного – от 0,05 до 4 А/м (от 0,06 до 5 мкТл). Относительная погрешность измерений прибора составляет $\pm 15\%$ при измерении как электрической, так и магнитной составляющих. Благодаря изотропности магнитной и электрической антенн нет необходимости в процессе измерений ориентировать антенны в различных направлениях.

Результаты. Территория изысканий и 10 контрольных точек, в которых проводились измерения, представлены на рисунке. Замеры в этих точках проводились на нормативных высотах 1,8 и 1,5 м относительно поверхности земли. Результаты замеров приведены в таблице, где представлены наибольшие значения напряженностей из измеренных на этих высотах.

Напряженность электрического поля изменяется в пределах от незначительной на уровне пороговой чувствительности измерительного прибора (менее 0,01 кВ/м) вблизи ЛЭП до 0,9 кВ/м на расстоянии 0,5 м от трансформатора локальной подстанции. Напряженность магнитного поля изменяется в пределах от 0,7 А/м вблизи ЛЭП до 3,8 А/м на расстоянии 0,5 м от северной стороны здания главной понизительной подстанции.

С учетом критериев СанПиН 2971–84. Санитарные нормы и правила защиты населения от воздействия электрического поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи переменного тока промышленной частоты (М.: Минздрав СССР, 1984), СанПиН 2.2.4.1191–03. Электромагнитные поля в производственных условиях (М.: Минздрав РФ, 2003),



Карта-схема расположения контрольных точек измерения ЭМП. Территория изысканий включает заштрихованную зону и полосы шириной 20 м по каждую сторону от отмеченных линейных объектов

Результаты замеров электрической и магнитной составляющих ЭМП

№ контрольных точек	Местоположение точек	Измеряемые параметры	
		напряженность электрического поля, кВ/м	напряженность магнитного поля, А/м
1	На расстоянии 0,5 м от стены здания насосной станции	0,08	2,3
2	На расстоянии 0,5 м от трансформатора локальной подстанции	0,9	2,8
3	Вблизи контрольно-пропускного пункта	0,2	1,5
4	Вблизи ЛЭП, на расстоянии максимальной интенсивности ЭМП	< 0,01	0,7
5	»	< 0,01	0,9
6	»	< 0,01	1,0
7	»	< 0,01	1,0
8	На расстоянии 0,5 м от здания главной понизительной подстанции (южная сторона)	0,09	1,7
9	На расстоянии 0,5 м от здания главной понизительной подстанции (западная сторона)	0,15	3,2
10	На расстоянии 0,5 м от здания главной понизительной подстанции (северная сторона)	0,19	3,8

ГН 2.1.8/2.2.4.2262–07. Предельно допустимые уровни магнитных полей частотой 50 Гц в помещениях жилых, общественных зданий и на селитебных территориях (М.: Минздрав РФ, 2007), устанавливающих предельно допустимые уровни напряженностей электрического и магнитного полей (соответственно 15 кВ/м и 16 А/м), измеренные величины электромагнитного поля на исследуемом объекте не превышают установленных предельно допустимых уровней.

Проектом реконструкции системы водоснабжения предусматривается строительство дополнительной насосной станции 2-го подъема с локальной подстанцией 6/0,4 кВ, а также дополнительной ветки ЛЭП 6 кВ. Принимая во внимание полученные результаты, можно сделать вывод о том, что реконструируемые объекты электросетевого хозяйства не создадут ЭМП неприемлемой интенсивности. Несмотря на очевидность отсутствия опасности от воздействия ЭМП реконструируемого объекта, данное исследование оказалось полезным с точки зрения информирования населения о несущественной интенсивности ЭМП, создаваемых этим объектом.

Планирование исследований ЭМП в составе инженерно-экологических изысканий. Приобретенный опыт натурных измерений ЭМП, а также рекомендации, изложенные в [3], позволяют построить соответствующую схему исследований, используемую при разработке программ инженерно-экологических изысканий. Подобные исследования предусматривают следующие этапы:

1. Сбор и анализ картографической информации и технической документации о территории намечаемого строительства, включая местоположение источников ЭМП и их интенсивности, трассы ЛЭП, селитебные зоны.

2. Рекогносцировочное обследование местности, рельефа, природных и техногенных объектов, оказывающих влияние на ЭМП.
 3. Предварительные оценки интенсивности ЭМП – расчетные либо на основании объектов-аналогов (при необходимости).
 4. Выбор контрольных точек и составление плана (схемы) натурных измерений ЭМП.
 5. Выполнение измерений.
 6. Обобщение результатов, выявление опасных зон, разработка рекомендаций по защите населения и персонала от негативного воздействия ЭМП.
- Возможные варианты защиты от вредного воздействия ЭМП включают [1, 2]:
- организацию режима работы предприятий, имеющих высоковольтное оборудование, обеспечивающего минимальную продолжительность нахождения персонала вблизи источников ЭМП;
 - размещение помещений с работающим персоналом на удаленном расстоянии от источников ЭМП;
 - проектирование электрических цепей с конфигурацией, компенсирующей ЭМП, возникающие от отдельных элементов электросетевого хозяйства;
 - экранирование источников ЭМП на предприятиях и в транспорте;
 - использование экранирующих строительных материалов;
 - прокладку высоковольтных линий на удаленном расстоянии от жилой застройки и мест скопления людей;
 - организацию санитарно-защитных зон в соответствии с нормативными требованиями;
 - посадку древесных насаждений в селитебных зонах.

Кроме того, важным мероприятием для обеспечения безопасности от воздействия ЭМП на селитебных территориях является мониторинг ЭМП [5].

- Заключение.**
1. Обоснована необходимость производства натурных измерений ЭМП в составе инженерных изысканий.
 2. Выполнены измерения напряженности электрического и магнитного полей промышленной частоты, создаваемых объектами электросетевого хозяйства системы водоснабжения г. Дудинки.
 3. Установлено, что интенсивность ЭМП вблизи объектов электросетевого хозяйства незначительна и не превышает установленных нормативных значений.
 4. Предложена схема исследований ЭМП, рекомендуемая для использования при разработке программ инженерно-экологических изысканий.

Авторы выражают признательность К.Ф. Селифановой – ведущему инженеру-экологу ООО «Экостандарт “Технические решения”» (Санкт-Петербург) за полезные консультации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz) // Health Physics. 2010. Iss. 6. Pp. 818–836.

2. Epidemiology of Electromagnetic Fields // Ed. M. Roosli. Boca Raton (FL), USA: CRC Press, 2014. 368 p.
3. П о л о у с о в а Е.П. О планировании натурных измерений электромагнитных полей промышленной частоты в рамках инженерно-экологических изысканий // Вестн. Моск. гос. обл. ун-та. Сер. Естественные науки. 2010. № 3. С. 128–129.
4. Л а з о р и н а Е.П. Некоторые результаты натурных измерений электромагнитных полей на электроподстанции Уча (Московская обл.) // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвящ. 145-летию МГТУ «МАМИ». Кн. 10. М.: МГТУ «МАМИ», 2010. С. 69–71.
5. Г р а ф к и н а М.В., Н ю н и н Б.Н., С в и р и д о в а Е.Ю. Определение энергетического низкочастотного воздействия на застроенных территориях // Вестн. МГСУ. 2014. № 4. С. 116–124.

Амирханян Мария Зауровна, инж.; E-mail: amirkhanyan.maria@gmail.com
ООО НПО «Гидротехпроект»

Брюхань Федор Федорович, д-р физ.-мат. наук; E-mail: pniis-gip@mail.ru
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Кучмин Алексей Викторович, инж.; E-mail: ak@npogtp.ru
ООО НПО «Гидротехпроект»

Получено после доработки 12.01.17

Amirkhanyan Mariya Zaurovna, Engineer; E-mail: amirkhanyan.maria@gmail.com
Scientific & Industrial Association Gidrotekhpunkt, Russia

Bryukhan' Fedor Fedorovich, DSc; E-mail: pniis-gip@mail.ru
Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Kuchmin Alexey Viktorovich, Engineer; E-mail: ak@npogtp.ru
Scientific & Industrial Association Gidrotekhpunkt, Russia

FIELD MEASUREMENTS OF ELECTROMAGNETIC FIELDS WITH THE FREQUENCY OF 50 Hz IN THE FRAMEWORK OF ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL SURVEYS

The increasing volumes of electricity consumption, as well as the increased attention of society to the environmental conditions of the habitat determine the need for a comprehensive study of the negative factors of human exposure, including electromagnetic fields (EMF). In particular, EMF studies are conducted for construction activities as a part of engineering and environmental surveys. However, the EMF measurement and generalization of their results at the preproject stages of construction are not sufficiently developed and require detailed elaboration. The article substantiates the necessity of producing full-scale EMF measurements in the engineering surveys. The measurements of EMF created by power grid facilities of the water supply system in Dudinka City were conducted and their low intensity was established. A scheme for EMF investigation for its use in programs of engineering and environmental surveys is proposed.

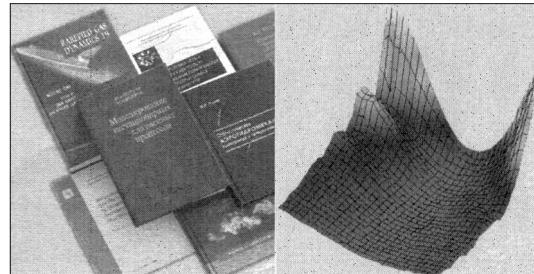
К e y w o r d s: ecology, electromagnetic field, construction, engineering and environmental surveys, power grid facilities.

REFERENCES

1. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz). Health Physics. 2010. Iss. 6. Pp. 818–836.

2. Epidemiology of Electromagnetic Fields. Ed. M. Roosli. Boca Raton (FL), USA: CRC Press, 2014. 368 p.
3. Polousova E.P. O planirovaniy naturnykh izmereniy elektromagnitnykh poley promyshlennoy chasty v ramkakh inzhenerno-ekologicheskikh izyskaniy [The planning of measurements of electromagnetic fields of industrial frequency as a part of engineering-ecological researches]. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta. Seriya Estestvennye nauki [Bulletin of Moscow State Regional University. Series Natural Sciences]. 2010. No. 3. Pp. 128–129 (in Russian)
4. Lazorina E.P. Nekotorye rezul'taty naturnykh izmereniy elektromagnitnykh poley na elektropodstantsii Ucha (Moskovskaya oblast') [Results of measurements of electromagnetic fields at an electrical substation Teaching (Moscow region)]. Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Avtomobile- i traktorostroenie v Rossii: prioritety razvitiya i podgotovka kadrov», posvyashchennoy 145-letiyu MGTU «MAMI» [Materials of international scientific-technical conference «Automobile and tractor industry in Russia: development priorities and training», dedicated to the 145th anniversary of MGTU «MAMI»]. Kn. 10. Moscow, MGTU «MAMI», 2010. Pp. 69–71 (in Russian)
5. Grafkina M.V., Yunin B.N., Sviridova E.Yu. Opredelenie energeticheskogo nizkochastotnogo vozdeystviya na zastroyennykh territoriyakh [The Definition of lowfrequency energy effect in built up areas]. Vestnik MGSU [Bulletin MGSU]. 2014. No. 4. Pp. 116–124 (in Russian)

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 624.011

М.А. АРКАЕВ, В.И. ЖАДАНОВ

РАСЧЕТ ОДНОСРЕЗНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ВИТЫХ КРЕСТООБРАЗНЫХ НАГЕЛЯХ ПРИ УСИЛЕНИИ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПУТЕМ УВЕЛИЧЕНИЯ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

В процессе эксплуатации деревянных конструкций зачастую возникает необходимость их восстановления и усиления. Наиболее простым и в то же время эффективным способом является усиление путем увеличения поперечного сечения. Зачастую соединение усиливающего элемента и элемента усиления является односрезным, при этом в таких соединениях распространено использование механических соединительных связей нагельного типа. На пути совершенствования традиционных типов связей, имеющих ряд недостатков, были разработаны витые крестообразные стержни. Приведен алгоритм расчета односрезных соединений деревянных конструкций на предлагаемых нагелях, при этом определены особенности расчета, связанные с витой формой и крестообразным поперечным сечением нагеля. Приведены конкретные формулы для определения несущей способности витых крестообразных соединительных связей из условий смятия древесины и изгиба самого нагеля.

Ключевые слова: витой крестообразный нагель, односрезное соединение, усиление деревянных конструкций, численные исследования.

В течение жизненного цикла деревянных конструкций различного назначения возникает необходимость их восстановления или усиления. Связано это, прежде всего, с тем, что во время эксплуатации воздействие различных факторов приводит к снижению их эксплуатационной надежности и долговечности. Кроме того, необходимость усиления конструкций может возникнуть и вследствие увеличения действующих на них нагрузок [1–3].

Проведенный анализ существующих способов усиления балочных деревянных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений показал, что наиболее простым и эффективным способом является усиление путем увеличения площади поперечного сечения [4]. При использовании такого способа усиливающий элемент и элементы усиления образуют составной стержень, т.е. стержень, поперечное сечение которого состоит из нескольких частей, соединенных между собой соединительными связями, при этом зачастую образуется односрезное соединение (рис. 1).

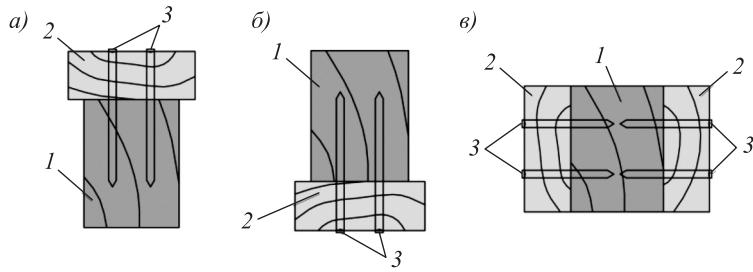


Рис. 1. Варианты усиления путем увеличения поперечного сечения с расположением элементов усиления у верхней грани (а); у нижней грани (б); у боковых граней (в)

1 – усиливаемый элемент, 2 – элемент усиления, 3 – соединительная связь

Использование абсолютно жестких связей (например, клея) связано со значительной сложностью и большой трудоемкостью выполнения работ. Поэтому при усилении эксплуатируемых деревянных конструкций чаще используют дискретные механические связи, при этом наибольшее распространение получили связи нагельного типа. На пути совершенствования традиционных механических связей, имеющих отрицательные особенности [5], в ОГУ были разработаны стальные витые крестообразные стержни [6, 7] (рис. 2).

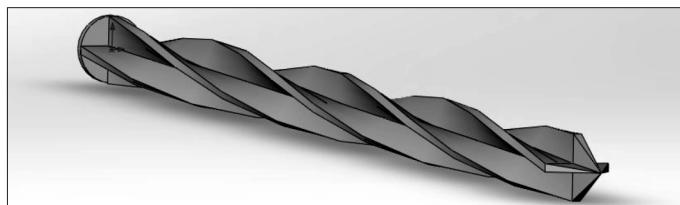


Рис. 2. Общий вид витого крестообразного стержня

При расчете соединений деревянных элементов на витых крестообразных нагелях несущая способность определяется из условий смятия деревянных элементов и изгиба соединительного элемента. Возможные случаи разрушения исследованных автором односрезных соединений от смятия древесины показаны на рис. 3, а, от изгиба соединительных связей на рис. 3, б, в.

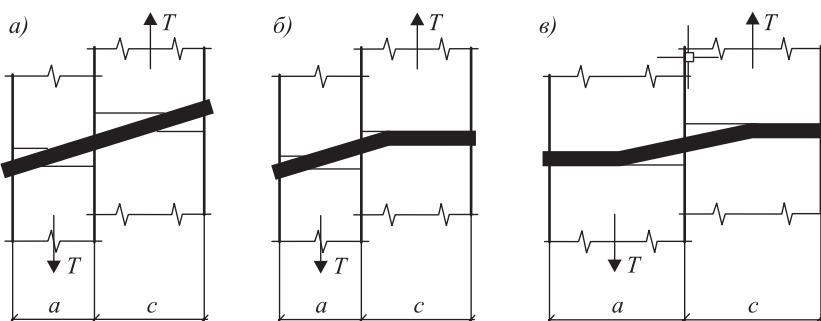


Рис. 3. Возможные случаи разрушения односрезных соединений
а – от смятия древесины; б, в – от изгиба нагеля с образованием одного и двух пластических шарниров соответственно

Значение предельного кратковременного усилия для соединения по смятию элементов с толщиной a и c может быть найдено для предлагаемых нагелей по аналогии с цилиндрическими нагелями соответственно по формулам [8, 9]:

$$T_a^{\text{bp}} = k_a a d R_{\text{см.}a}^{\text{bp}}, \quad (1)$$

$$T_c^{\text{bp}} = k_c c d R_{\text{см.}c}^{\text{bp}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{см.}a}^{\text{bp}}$, $R_{\text{см.}c}^{\text{bp}}$ – соответственно временные сопротивления смятию древесины в гнездах для элементов a и c ;

k_a , k_c – числовые коэффициенты, характеризующие степень использования нагельного гнезда в каждом элементе;

d – диаметр нагеля, см.

Для общего случая, когда $a \neq c$ и $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$, при $\delta_{\text{см}}^n / \delta_{\text{см}}^y = \infty$ числовые коэффициенты в (1) и (2) определяются по формулам:

$$k_a = \frac{-(1+1/n) + \sqrt{(1+1/n)^2 + (1+m)(1+1/mn^2)}}{1+m}, \quad (3)$$

$$k_c = \frac{-(1+n) + \sqrt{(1+n)^2 + (1+1/m)(1+n^2m)}}{1+1/m}, \quad (4)$$

где $m = \frac{R_{\text{см.}a}^{\text{bp}}}{R_{\text{см.}c}^{\text{bp}}}$; $n = \frac{a}{c}$.

Найдем предельную несущую способность соединений из условия изгиба соединительного элемента

$$T_i = k_i \cdot d^2 \cdot \sqrt{R_{\text{см}}^{\text{bp}} \cdot R_t}, \quad (5)$$

где k_i – числовой коэффициент, определяемый схемой исчерпания прочности соединения с образованием по длине нагеля пластических шарниров;

R_t – предел текучести стали;

$R_{\text{см}}^{\text{bp}}$ – временное сопротивление древесины смятию в нагельном гнезде вдоль волокон.

Вычислим значение коэффициента k_i для случаев разрушения, обусловленных образованием пластического шарнира в пределах элемента с толщиной c :

$$k_i = k'_a \frac{a}{d} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{см}}^{\text{bp}}}{R_t}} \cdot m_a, \quad (6)$$

$$k'_a = \frac{\sqrt{1 + (1 + 2m) \left(1 + \frac{4M_{\text{пл}}}{a^2 d R_{\text{см.}a}^{\text{bp}}} \right)} - 1}{1 + 2m} \quad (7)$$

и с толщиной a :

$$k_i = k'_c \frac{c}{d} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{см}}^{\text{bp}}}{R_t}} \cdot m_c, \quad (8)$$

$$k'_c = \frac{\sqrt{1 + \left(1 + 2\frac{1}{m}\right) \left(1 - \frac{4M_{\text{пл}}}{c^2 d R_{\text{см.}c}^{\text{вр}}}\right)} - 1}{1 + 2\frac{1}{m}}. \quad (9)$$

В формулах (6)–(9):

$$m_a = \frac{R_{\text{см.}a}^{\text{вр}}}{R_{\text{см}}^{\text{вр}}}; \quad m_c = \frac{R_{\text{см.}c}^{\text{вр}}}{R_{\text{см}}^{\text{вр}}}.$$

В общем случае, в том числе и для витых крестообразных нагелей, значение предельного пластического момента поперечного сечения нагеля $M_{\text{пл}}$ определяется по формуле

$$M_{\text{пл}} = W_{\text{пл}} \cdot R_{\text{т}}, \quad (10)$$

где $W_{\text{пл}}$ – пластический момент сопротивления нагеля.

Максимальное значение числового коэффициента k_u находим из условия работы нагеля на изгиб при избыточном защемлении нагеля в обоих соединяемых элементах, характеризующимся образованием двух пластических шарниров (см. рис. 3, в):

$$k_u^{\max} = 2 \cdot \sqrt{\frac{M_{\text{пл}} m_a}{d^3 R_{\text{т}} (1+m)}}. \quad (11)$$

Минимальное значение числового коэффициента k_u обусловливается образованием пластического шарнира в одном из элементов при равномерном распределении напряжений смятия вдоль нагеля в другом элементе (рис. 3, б), что соответствует наиболее невыгодному случаю работы нагеля на изгиб.

Вычислим значение k_u^{\min} для случая разрушения от образования пластического шарнира в элементе с толщиной a

$$k_u^{\min} = \sqrt{\frac{2M_{\text{пл}} m_a}{d^3 R_{\text{т}} (1+m)}} \quad (12)$$

и с толщиной c

$$k_u^{\min} = \sqrt{\frac{2M_{\text{пл}} m_c}{d^3 R_{\text{т}} (1+1/m)}}. \quad (13)$$

Алгоритм определения несущей способности нагелей, приведенный выше, получен на основании правил и законов сопротивления материалов. Приведенные формулы актуальны как для цилиндрических нагелей, так и для предлагаемых витых крестообразных, однако при использовании последних необходимо учитывать следующие особенности.

1. По результатам проведенных численных исследований [10] выявлено, что сопротивления древесины при ее смятии в отверстии жестким цилиндрическим штампом и штампом витой формы крестообразного поперечного сечения различны. В связи с этим были усовершенствованы известные формулы для цилиндрических нагелей, что позволяет определять временное

сопротивление древесины смятию витыми крестообразными стержнями вдоль волокон ($R_{\text{см}}^{\text{bp}}$) и поперек волокон ($R_{\text{см}90}^{\text{bp}}$):

$$R_{\text{см}}^{\text{bp}} = 0,8R_{\text{c}}^{\text{bp}}(1,1 - 0,11d) \times k, \text{ МПа}, \quad (14)$$

$$R_{\text{см}90}^{\text{bp}} = 0,1R_{\text{c}}^{\text{bp}} \left(1 + \frac{2,5}{d^{0,55}} \right) \times k_{90}, \text{ МПа}, \quad (15)$$

где R_{c}^{bp} – временное сопротивление древесины при сжатии вдоль волокон; k – коэффициент, учитывающий витую форму и крестообразное сечение нагеля при смятии вдоль волокон, $k = 1,4$.

k_{90} – коэффициент, учитывающий витую форму и крестообразное сечение нагеля при смятии поперек волокон, $k_{90} = 1,1$.

2. Методика для конструирования различных соединений деревянных конструкций в действующей нормативной документации СП 64.13330.2011 «Деревянные конструкции» распространяется исключительно на цилиндрические нагели, при этом в качестве материала для стальных нагелей предусмотрена сталь А240 ($R_{\text{t}} = 235$ МПа). Предлагаемые витые крестообразные нагели изготовлены из стали марки 40Х с термообработкой ГОСТ 4543–71 ($R_{\text{t}} = 785$ МПа).

3. При определении коэффициентов $k_{\text{и}}$, $k_{\text{и}}^{\max}$, $k_{\text{и}}^{\min}$ по формулам (6)–(13) необходимо учитывать пластический момент сопротивления нагеля $W_{\text{пл}}$ с учетом принятой толщины ребер в 2 мм, значение которого определяется по законам сопротивления материалов по формуле (10).

Для исследуемых крестообразных стержней витой формы ориентация ребер по длине стержня будет менять свое положение, следовательно, и

пластический момент сопротивления $W_{\text{пл}}$ будет изменяться и принимать промежуточное значение между $W_{\text{пл}}^+$ (ориентация ребер – $0^\circ(90^\circ)$) и $W_{\text{пл}}^\times$ (ориентация – 45°).

Для объективной оценки напряженно-деформированного состояния односрезных соединений были проведены их численные исследования в программном комплексе Ansys WorkBench.

Были созданы геометрические трехмерные модели деревянных элементов и витых крестообразных нагелей. После создания моделей отдельных элементов в режиме сборки из них были созданы трехмерные твердотельные сборочные единицы (рис. 4).

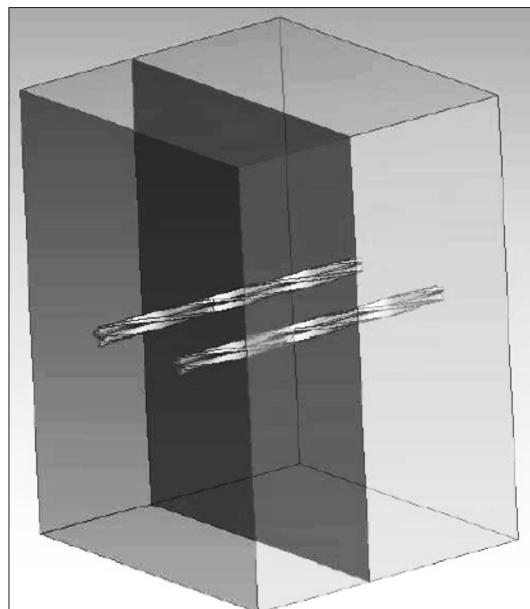


Рис. 4. Общий вид трехмерной модели односрезного соединения на витых крестообразных нагелях

При проведении исследований рассматривались комбинации различных толщин соединяемых элементов (табл. 1).

Следующим этапом было задание физико-механических характеристик деревянного бруса и нагеля, при этом учитывалась анизотропия древесины. Далее задавался контакт между нагелем и массивом деревянного бруса, тип контакта – без трения. Для генерации конечно-элементной сетки в программном комплексе Ansys WorkBench использовался встроенный автоматический генератор объемных сеток в модуле Static Structural.

Для твердотельного моделирования деревянного бруса были использованы объемные конечные элементы 1-го порядка тетраэдрической формы. При моделировании нагелей в качестве конечных элементов использовались объемные конечные элементы формы гексаэдра.

Нагрузка на один нагель односрезного соединения при перемещении деревянного элемента с меньшей толщиной на 1 мм для различных толщин соединяемых элементов приведена в табл. 2.

Таблица 2

Тип нагеля	Размеры нагеля d , мм	Номер комбинации толщин элементов	N , кН
Витой крестообразный	10	1	3,42
		2	2,77
		3	2,98
		4	3,64
		5	3,67

По полученным результатам можно сделать вывод о том, что несущая способность односрезного соединения с комбинацией толщин деревянных элементов 2, 3 является наименьшей.

Проведем анализ полученных результатов. На рис. 5 приведены изополя перемещений витого крестообразного стержня в односрезных соединениях с комбинациями толщин элементов 1 и 2.

Для комбинации 1 ориентация ребер витого крестообразного нагеля на плоскости сплачивания будет $0^\circ(90^\circ)$, для комбинации 2 – 45° . Однако, как

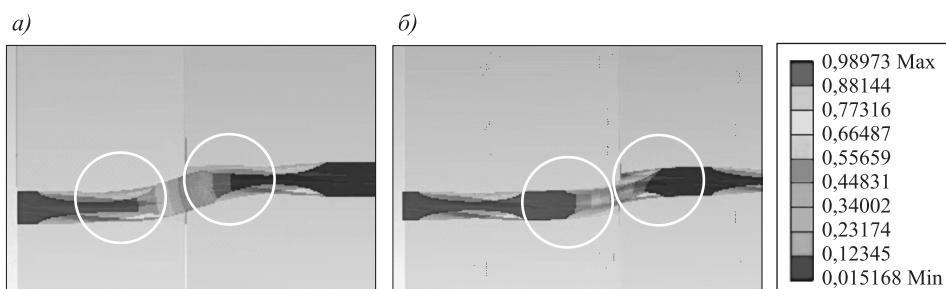


Рис. 5. Изополя перемещений витого крестообразного стержня в соединении с комбинацией толщин элементов 1 (а), с комбинацией 2 (б)

уже говорилось выше, разрушение соединения из-за изгиба нагеля сопровождается образованием одного или двух пластических шарниров, следовательно, необходимо определить ориентацию ребер нагеля именно в точках образования шарниров. На рис. 5 кругами указаны зоны образования пластических шарниров, ориентация ребер для комбинации 1 составит 45° и 50° для элементов с толщинами a и c соответственно, для комбинации 2 – 14° и 8° . Таким образом, положение ребер для комбинации 1 будет ближе к положению 45° , для комбинации 2 – к положению 0° (90°).

Для определения наилучшей ориентации ребер обратимся к значениям пластического момента сопротивления $W_{\text{пл}}$ прямолинейных крестообразных нагелей с толщиной ребер 2 мм при их ориентации 0° (90°) и 45° , которые приведены в табл. 3.

Таблица 3

Ориентация ребер по отношению к волокнам древесины	Геометрическая характеристика сечения	Габаритный размер нагеля, мм					
		10	12	14	16	18	20
$0-90^\circ$	$W_{\text{пл}}^+$, см ³	0,058	0,082	0,110	0,142	0,178	0,218
45°	$W_{\text{пл}}^\times$, см ³	0,070	0,101	0,138	0,180	0,228	0,282

Согласно табл. 3, значения $W_{\text{пл}}$ для прямолинейных стержней при ориентации ребер 45° максимальны, при ориентации 0° (90°) – минимальны, при ориентации ребер между 0° (90°) и 45° будут соответственно принимать промежуточное значение. Этим и объясняется тот факт, что соединение с комбинацией толщин деревянных элементов 2 обладает меньшей несущей способностью, чем соединение с комбинацией 1.

Для исследуемых крестообразных стержней витой формы ориентация ребер по длине стержня будет менять свое положение, следовательно, данный факт будет находить отражение и в значении пластического момента сопротивления $W_{\text{пл}}$. Учитывая сложность определения конкретного местоположения точек образования пластических шарниров и контроля ориентации ребер в этих точках, целесообразно в расчетах принимать минимальные значения характеристики $W_{\text{пл}}$ крестообразного поперечного сечения, что соответствует ориентации ребер 0° (90°).

Выводы. В расчете односрезных соединений усовершенствована методика определения несущей способности витых крестообразных соединительных связей из условий смятия древесины и изгиба самого нагеля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Большаков В.В. Руководство по эксплуатации и ремонту деревянных конструкций. М.; Л.: Госстройиздат, 1939.
- Гуськов И.М. Эксплуатация деревянных конструкций и методы устранения их дефектов: учеб. пособие. М., 1982. 106 с.
- Гуськов И.М. Ремонт деревянных конструкций: учеб. пособие. М., 1982. 75 с.
- Аркаев М.А., Столповский Г.А., Шмелев К.В., Сергеев М.И. Способы усиления стержневых деревянных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений // Вестн. Оренбург. гос. ун-та. 2013. № 5. С. 158–163.

5. Аркаев М.А., Огир А.Ю. О недостатках механических связей нагельного типа в деревянных конструкциях // Строительная наука-2014: теория, образование, практика, инновации: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. Архангельск: Изд-во ООО «Типография “ТОЧКА”», 2014. С. 23–27.
6. Столповский Г.А. Соединение деревянных элементов на витых крестообразных стержнях, работающих на выдергивание: дис. ... канд. техн. наук. Оренбург, 2011. 186 с.
7. Столповский Г.А., Жаданов В.И., Гарипов В.С. Применение методов планирования эксперимента при поиске оптимальных параметров винтового стержня, влияющих на усилие его выдергивания из массива древесины // Изв. вузов. Строительство. 2011. № 2. С. 109–116.
8. Дмитриев П.А. Экспериментальные исследования соединений элементов деревянных конструкций на металлических и пластмассовых нагелях и теория их расчета с учетом упруговязких и пластических деформаций: дис. ... д-ра техн. наук. Новосибирск: НИСИ, 1975. 529 с.
9. Дмитриев П.А. Исследование прочности древесины на смятие в отверстии при кратковременном и длительном действии нагрузок // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1965. С. 165–173.
10. Жаданов В.И., Аркаев М.А., Рожков А.Ф. Учет витой формы крестообразного нагеля в расчете балочных деревянных конструкций при их усиении путем увеличения поперечного сечения // Строительная механика и расчет сооружений. 2016. № 6. С. 55–59.

Аркаев Максим Александрович, препод.; E-mail: arkaevrus@mail.ru

Оренбургский государственный университет

Жаданов Виктор Иванович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: organ-2003@bk.ru

Оренбургский государственный университет

Получено после доработки 27.01.17

Arkaev Maksim Alexandrovich, Lecturer; E-mail: arkaevrus@mail.ru

Orenburg State University, Russia

Zhadanov Viktor Ivanovich, DSc, Professor; E-mail: organ-2003@bk.ru

Orenburg State University, Russia

CALCULATION OF SINGLE-SHEAR JOINTS ON TWISTED CRUCIFORM DOWELS WHILE STRENGTHENING WOODEN DESIGNS BY INCREASING CROSS SECTION

Often in use of wooden constructions, there is a need of their restoration and strengthening. Strengthening by increasing cross section is the simplest and at the same time an efficient way to do it. Often connection of the strengthened element and strengthening element is single-shear joint, and at the same time in such connections use of mechanical connections on dowels is widespread. Twisted cruciform rod stocks were developed to improve traditional types of connections, which have a number of disadvantages. In this article is provided a calculation algorithm for single-shear joints of wooden designs on offered dowels and at the same time are defined the main features of calculation, related to a twisted form and a cruciform cross section of dowel. Specific formulas for determination of bearing strength of twisted cruciform connections in conditions of a wood's bearing strain and dowel's bend are given.

К e y w o r d s: twisted cruciform dowel, single-shear joint, strengthening of wooden designs, numerical researches.

REFERENCES

1. B o l ’ s h a k o v V.V. Rukovodstvo po ekspluatatsii i remontu derevyannykh konstruktsiy [Manual on operation and repair of wooden designs]. Moscow; Leningrad, Gosstroyizdat, 1939. (in Russian)
2. G u s ’ k o v I.M. Ekspluatatsiya derevyannykh konstruktsiy i metody ustraneniya ikh defektov: uchebnoe posobie [Exploitation of wooden designs and methods of elimination of their defects: education guidance]. Moscow, 1982. 106 p. (in Russian)
3. G u s ’ k o v I.M. Remont derevyannykh konstruktsiy: uchebnoe posobie [Repair of wooden designs: education guidance]. Moscow, 1982. 75 p. (in Russian)
4. A r k a e v M.A., S t o l p o v s k i y G.A., S h m e l e v K.V., S e r g e e v M.I. Sposoby usileniya sterzhnevykh derevyannykh konstruktsiy ekspluatiruemymkh zdaniy i sooruzheniy [Ways of strengthening of wooden rod structures of the exploited buildings and constructions]. Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta [News of the Orenburg State University]. 2013. No. 5. Pp. 158–163. (in Russian)
5. A r k a e v M.A., O g i r A.Yu. O nedostatkakh mekhanicheskikh svyazey nagel’nogo tipa v derevyannykh konstruktsiyakh [About disadvantages of dowel type mechanical connections in wooden designs]. Stroitel’naya Nauka-2014: teoriya, obrazovanie, praktika, innovatsii: sbornik trudov mezhdun. nauch.-tekhn. konf. [Structural science-2014: theory, education, practice, innovations: collection of works international scientific conference]. Arkhangelsk, Publishing house OOO «Tipografiya “TOCHKA”», 2014. Pp. 23–27. (in Russian)
6. S t o l p o v s k i y G.A. Soedinenie derevyannykh elementov na vitykh kresto-obraznykh sterzhnyakh, rabotayushchikh na vydergivanie: dis. ... kand. tekhn. nauk [Connection of wooden elements on the twisted cruciform rod stock working on wrest: dis. ... PhD]. Orenburg, 2011. 186 p. (in Russian)
7. S t o l p o v s k i y G.A., Z h a d a n o v V.I., G a r i p o v V.S. Primenenie metodov planirovaniya eksperimenta pri poiske optimal’nykh parametrov vintovogo sterzhnya, vliyayushchikh na usilie ego vydergivaniya iz massiva drevesiny [Application of methods of experiment scheduling in searching the optimum parameters of a screw rod influencing on its wrest from the massif of wood]. Izvestiya vuzov. Stroitel’stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2011. No. 2. Pp. 109–116. (in Russian)
8. D m i t r i e v P.A. Eksperimental’nye issledovaniya soedineniy elementov derevyannykh konstruktsiy na metallicheskikh i plastmassovyxh nagelyakh i teoriya ikh rascheta s uchetom uprugovyazkikh i plasticheskikh deformatsiy: dis. ... d-ra tekhn. nauk [The experimental researches of elements connections of wooden designs on metal and plastic dowels and the theory of their calculation taking into account elastoviscous and plastic strains: dis. ... PhD]. Novosibirsk, NISI, 1975. 529 p. (in Russian)
9. D m i t r i e v P.A. Issledovanie prochnosti drevesiny na smyatie v otverstii pri kratkovremennom i dlitel’nom deystvii nagruzok [The research of wood strength on a bearing strain in an opening at short-term and long-lived action of loadings]. Izvestiya vuzov. Stroitel’stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture]. 1965. Pp. 165–173. (in Russian)
10. Z h a d a n o v V.I., A r k a e v M.A., R o z h k o v A.F. Uchet vitoy formy krestoobraznogo nagelya v raschete balochnykh derevyannykh konstruktsiy pri ikh usilenii putem uvelicheniya poperechnogo secheniya [Accounting the twisted form of cruciform dowel in calculation of the beam wooden constructions on strengthening by increase of cross section]. Stroitel’naya mekhanika i raschet sooruzheniy [Structural mechanics and calculation of constructions]. 2016. No. 6. Pp. 55–59. (in Russian)

УДК 662.63

О.Э. КОШЕЛЕВА, И.А. ПАУЛИ, Н.Ю. НИКОЛАЕВ

ИЗУЧЕНИЕ ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ ДРЕВЕСИНЫ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ХИМИЧЕСКИМИ РЕАГЕНТАМИ

Исследованы закономерности тепловых процессов, происходящих при нагревании образцов древесины двух пород (березы и сосны). Проведен сравнительный анализ влияния предварительной химической обработки древесины разными реагентами на ее устойчивость к воздействию высоких температур.

Ключевые слова: древесина сосны и березы, термический анализ, антипирены.

Природным высокомолекулярным композиционным материалом является древесина, способная возгораться и гореть на воздухе. Ее горение – непрерывный многостадийный процесс, основанный на самоускоряющейся экзотермической реакции взаимодействия с кислородом. Известно [1, 2], что стадии горения (рис. 1) включают следующие процессы:

- аккумуляция тепловой энергии от разных источников горения (чаще открытого пламени);
- термодеструкция древесины с образованием летучих веществ и твердого остатка – кокса;
- воспламенение и горение летучих веществ;
- беспламенное горение угля.

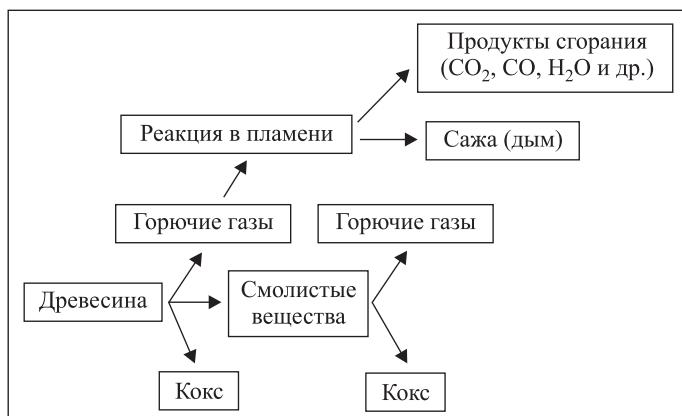


Рис. 1. Схема пламенного горения древесины

Начальный процесс горения древесины всегда связан с поглощением подводимой извне теплоты, необходимой для инициирования реакции с кислородом, и потому характеризуется эндотермическим тепловым эффектом.

При достижении достаточно высокой температуры процесс становится экзотермическим, начинается медленный процесс разложения поверхностной древесины с выделением летучих и нелетучих продуктов. Теперь уже

древесина сама отдает тепло, аккумулированное в ней при росте растения, во внешнюю среду. В результате накопления горючих продуктов разложения и смешивания их с воздухом в пограничном с поверхностью слое происходит воспламенение. А далее процесс горения поддерживается уже за счет тепла протекающих в пламени реакций окисления. На этой стадии скорость выделения тепла в ходе химических реакций превышает скорость тепловых потерь в окружающую среду.

Характер процесса горения древесины во многом определяется ее составом и структурой. Структура древесины и интенсивность внешнего теплового потока определяют скорость нагрева материала до температуры разложения, а скорость последующего разложения зависит от химического состава органических компонентов древесины.

К основным органическим компонентам древесного материала относят целлюлозу, гемицеллюлозу, лигнин и экстрактивные вещества. Соотношение компонентов варьируется и зависит от вида деревьев. Содержание целлюлозы в древесине хвойных пород может меняться в широких пределах от 32,5 до 55 %, а в лиственных породах – от 33,7 до 49 %. В древесине хвойных пород содержание лигнина выше ($30\pm4\%$) в сравнении с лиственными породами (в этом случае его содержание ниже 20–24 %). Макромолекулы лигнина имеют пространственное строение и состоят из фенилпропановых звеньев с одной (у хвойных) или двумя (у лиственных пород) метоксильными группами в ароматическом кольце. Треттым компонентом древесины является гемицеллюлоза – это олигосахарид со степенью полимеризации 30–200; в древесине лиственных пород преобладают пентозаны, в хвойных – гексозаны. В некоторых породах лиственной древесины содержание гемицеллюлоз достигает 30–35 %. Экстрактивные вещества включают низкомолекулярные органические соединения разных классов: терпены, многоатомные фенолы, сложные эфиры, смоляные и жирные кислоты, спирты, воски, смолы и т. п. (их суммарное содержание в древесине может достигать 16–20 %) [2].

Составные части древесины различаются термостабильностью и кинетическими параметрами разложения: гемицеллюлозы интенсивно разлагаются при температурах 225–325 °C, целлюлоза – при 325–375 °C, а лигнин распадается постепенно в диапазоне температур 250–500 °C. Меньшая термостабильность характерна для экстрактивных веществ, поэтому при их высоком содержании резко снижается начальная температура разложения древесины. Эти компоненты способствуют образованию кокса и дыма. В целом термодеструкция древесины завершается при температуре 450–470 °C.

Выделяемые в термодеструкции стадии (образование кокса и его выгорание) в древесине хвойных пород начинаются раньше, характеризуются большей скоростью выгорания древесины и кокса и более толстым слоем последнего.

В работе изучалось действие на древесину разных реагентов: гидроксида натрия, борной кислоты, сернокислого аммония и антиприпана промышленного изготовления «Пиротекс» – они в разной степени меняют химический состав и свойства древесного материала.

Химический состав антипирена «Пиротекс» был установлен методом газовой хроматографии на газовом хроматомасс-спектрометре Shimadzu GCMS 2010. В соответствии с базой данных основным компонентом «Пиротекса» является фторид натрия (рис. 2).

В качестве объектов исследования были взяты древесные опилки из сосны и березы, которые выдерживали в растворе каждого реагента в течение 30 мин без нагревания. Обработанный материал высушивали при комнатной температуре и затем до постоянной массы при температуре 70 °С в сушильном шкафу.

Исследования исходных и обработанных в разных реагентах образцов проводили на установке для термогравиметрического и дифференциального-термического анализа Thermoscan-2. Для всех образцов оценивали потерю массы и температурные диапазоны тепловых процессов, а также температуру воспламенения и теплоту горения. Зависимость теплосодержания

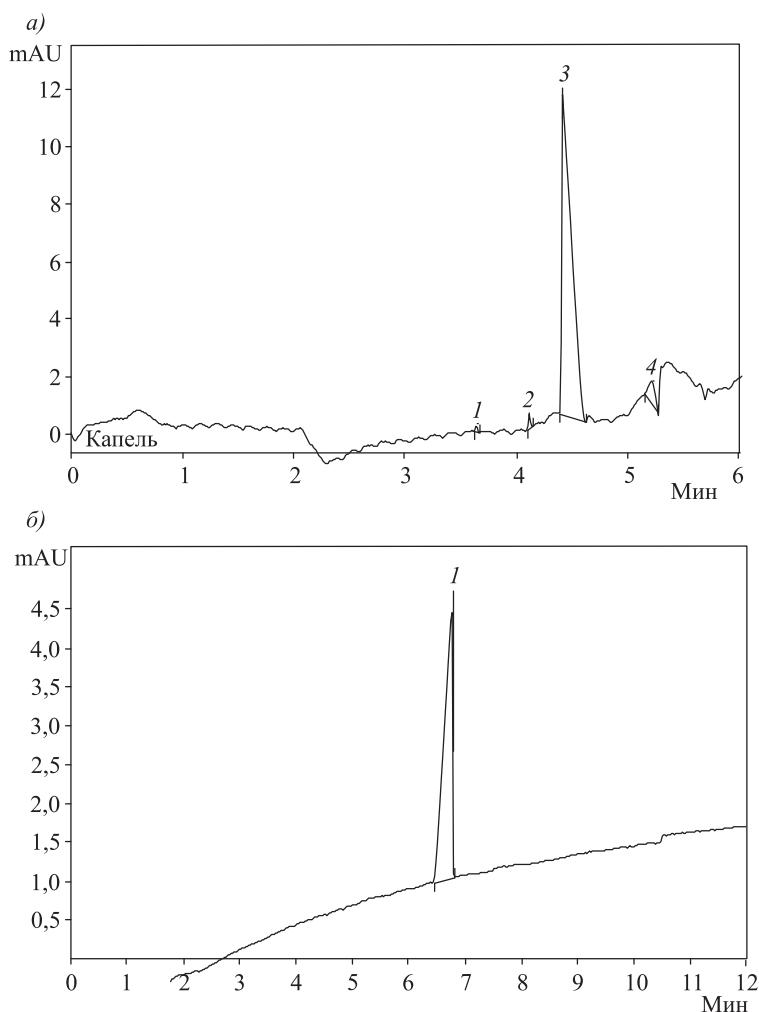


Рис. 2. Электрофорограммы антипирена «Пиротекс»
а – анионы: 1 – хлорид, 2 – нитрат, 3 – фторид, 4 – фосфат; б – катион:
1 – натрий

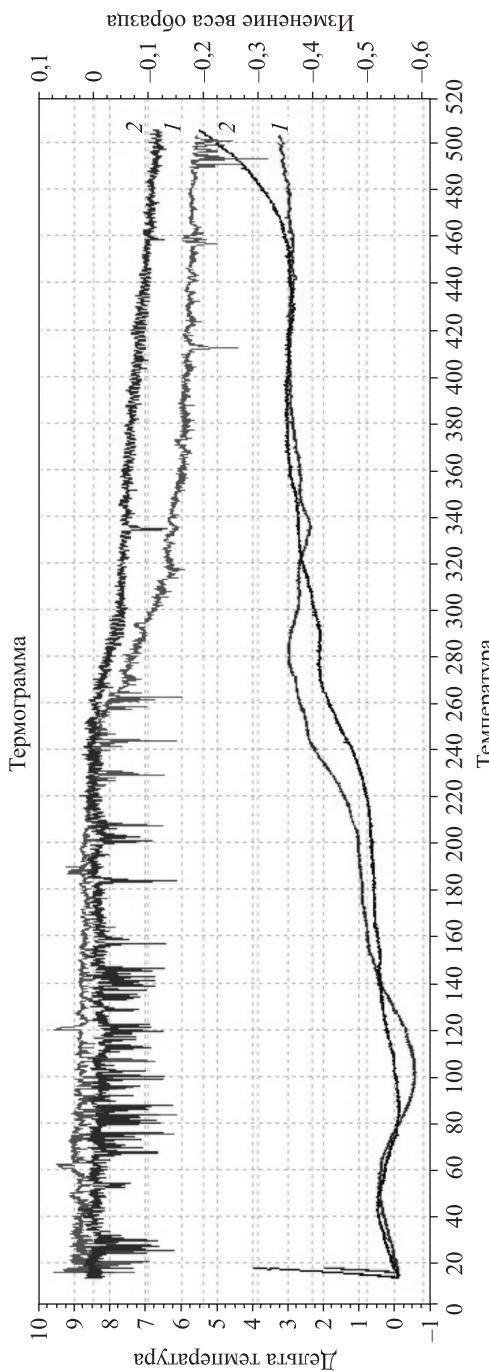


Рис. 3. Термограммы образцов: 1 – исходной березы; 2 – обработанной антипиреном «Пиротекс»

вещества от температуры регистрировали путем со-поставления температур ис-следуемого образца и этало-на. Потерю массы образца при нагревании определя-ли с помощью электрон-ной системы непрерывного взвешивания. Запись термо-грамм образцов древесины массой ~20 мг осуществля-лась при скорости нагрева 5 град./мин в кварцевых тиглях объемом 0,5 см³. Погрешность измерения те-пловых эффектов составля-ла 3 Дж/г.

На рис. 3 приведены термограммы двух образцов березы – исходной и после обработки антипиреном «Пиротекс».

По результатам терми-ческого анализа для всех об-разцов древесины (исход-ных и обработанных разны-ми реагентами) построены диаграммы температуры возгорания и потери их мас-сы (рис. 4 и 5).

На диаграмме (см. рис. 4) видно, что температура воз-горания исходного образца сосны на 40° ниже, чем ана-логичного образца березы, что соотвествует лите-ратурным данным [2]. Хвой-ные породы деревьев менее термоустойчивы по сравне-нию с лиственными порода-ми из-за большего содержа-

ния экстрактивных веществ. Обработка древесины реагентами во всех четы-рех случаях приводит к повышению температуры ее возгорания (см. рис. 4), однако величина этого повышения существенно различается. При этом на-блюдается незначительное отличие температур возгорания березы и сосны при обработке в одном и том же веществе. При анализе сделан вывод, что обработка реагентами древесины сосны в большей степени повышает ее устойчивость к возгоранию в сравнении с березой.

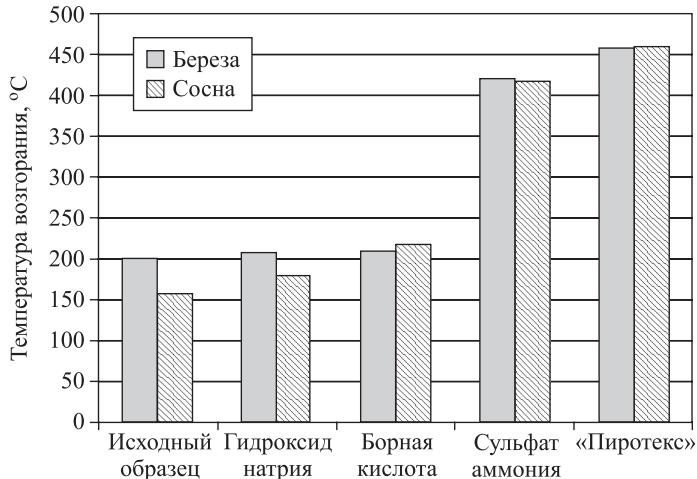


Рис. 4. Температура возгорания образцов древесины (исходной и после обработки разными реагентами)

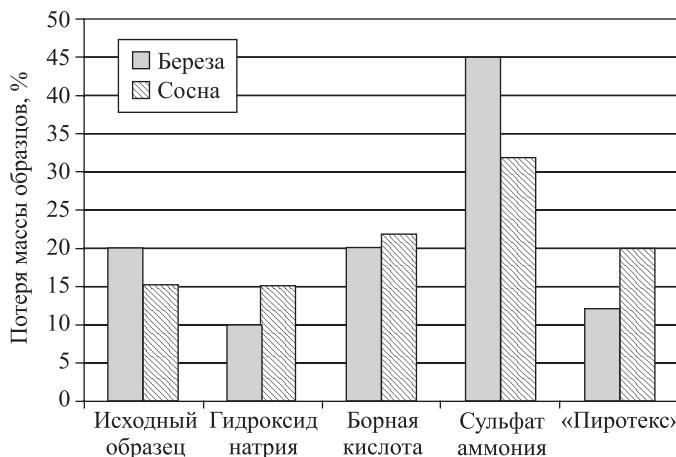


Рис. 5. Потеря массы образцов древесины при обработках

Самый небольшой прирост температуры возгорания древесины наблюдается при действии гидроксида натрия, который добавляли для выяснения влияния лигнина на термоустойчивость образцов (щелочи растворяют этот компонент древесины). У сосны этот показатель оказался выше на 20° по сравнению с исходной древесиной, а у березы температура возгорания не изменилась. Потери массы образцов при действии этого реагента самые минимальные, особенно в древесине березы, что, вероятно, обусловлено более низким содержанием лигнина в лиственных породах, о чем упоминалось выше.

Обработка борной кислотой несущественно повышает температуру возгорания древесины березы, в то время как температура возгорания сосны увеличивается примерно на 60° по сравнению с необработанным сырьем. При этом, как и следовало ожидать, потери массы в березовом образце не изменились. В сосне потери массы возросли на 7 %. Это, по-видимому, связано с выделением паров воды, образующихся при разложении борной

кислоты. При достижении температуры выше 70 °С борная кислота начинает терять воду, превращаясь в метаборную кислоту, а затем в оксид бора [3]. Повышение температуры возгорания сосны связано с охлаждением поверхности древесины в результате испарения воды и образованием оплавленной пленки из продуктов разложения. Незначительное повышение температуры возгорания березы и отсутствие потери массы, вероятно, обусловлено большей плотностью и, соответственно, меньшей глубиной пропитки древесины березы реагентом по сравнению с сосной.

Значительное повышение температуры возгорания древесины обеих пород наблюдается после ее обработки в насыщенном растворе сульфата аммония. Температура возгорания березы повысилась более чем на 200°, а сосны – более чем на 250°. При этом потери массы в обоих образцах достигают максимальной величины по отношению к обработке в других реагентах: по сравнению с исходным сырьем у сосны прирост потерь составил 17 %, у березы – 25 %. Такая потеря массы древесины наряду с возрастанием ее термоустойчивости, обусловлена природой используемого для обработки реагента $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и механизмом его действия. При нагревании сульфат аммония разлагается с образованием не поддерживающих горения газов (амиака, сернистого газа) и паров воды.

Процесс его разложения можно разбить на три стадии [4]:

1. $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 = \text{NH}_4\text{HSO}_4 + \text{NH}_3$ при температуре 100–357 °C.
2. Кипение NH_4HSO_4 при температуре 357–490 °C.
3. $\text{NH}_4\text{HSO}_4 = \text{NH}_3 + \text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ (примеси SO_2 , O_2), температура более 500 °C.

Негорючие газы оттесняют кислород от поверхности древесины, препятствуя ее горению, а испаряясь, охлаждают поверхность. Потеря массы древесины в этом случае обусловлена испарением этих газов.

Максимальный эффект термостойкости обеих пород древесины обнаруживается после пропитки антипиреном «Пиротекс». Возрастание температуры возгорания березы составило более 280°, а сосны – более 300°. При этом потери массы в образце сосны увеличились на 5 % по отношению к исходному сырью (составили 20 %), а для березы снизились на 8 % и составили 12 % в целом. Данный факт можно объяснить большей потерей смолистых веществ в хвойной древесине и, возможно, образованием атомарного фтора, эффективно уводящего продукты окисления древесины (активные радикалы и диоксид углерода) [4]. Механизм действия данного антипирена отличен от действия огнезащитного состава на основе борной кислоты, увеличивающей огнезащитные свойства древесных материалов за счет появления защитной пленки на поверхности. Основным компонентом «Пиротекса» является фторид натрия, входящий в состав огнетушащих смесей порошковых огнетушителей. Механизм воздействия этих смесей на распространение пламени заключается в гомогенном ингибировании реакций горения продуктами разложения или испарения частиц солей. При этом из зоны горения отводится тепло за счет теплопемкости компонентов, эндотермических процессов их плавления, испарения и разложения. Перешедшие в газовую фазу молекулы порошковой смеси или их радикалы, ионы, атомы, вступая в прямые реакции с активными центрами пламени (O_2 , $\text{H}\cdot$, $\text{HO}\cdot$, $\text{H}_3\text{C}\cdot$), способны замедлять процесс горения в газовой фазе [4].

Вероятно, при нагревании обработанной «Пиротексом» древесины происходит испарение и разложение фторида натрия с образованием атомов фтора, которые и играют роль ингибитора горения. При этом характер тепловых процессов для древесины хвойных и лиственных пород различен.

Таким образом, термическим методом исследован характер действия четырех неорганических водорастворимых реагентов на древесину лиственных и хвойных пород. Различие химического состава и структуры древесины определяет поведение этих пород деревьев при нагреве. Во всех случаях обработки термоустойчивость березы и сосны возрастает, при этом степень термостойкости древесины зависит от природы используемого реагента. Наиболее эффективным термозащитным действием обладает антиприрен «Пиротекс», механизм действия которого отличается от действия других антиприренов. «Пиротекс» не образует пленки на поверхности древесины, подобно борной кислоте, и не разлагается с образованием не поддерживающих горения газов, как это происходит с сульфатом аммония, он выступает в качестве ингибитора реакций окисления древесины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корольченко А.Я., Петрова Е.А. Современные средства огнезащиты древесины // Российский химический журнал. 2003. № 4. (<http://bent.ru/modules/Articles/article.php?storyid=357>)
2. Серков Б.Б., Асеева Р.М., Сивенков А.Б. Физико-химические основы горения и пожарная опасность древесины. Ч. 1 // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». 2011. № 6 (40). С. 1–18. (<http://ipb.mos.ru/ttb>)
3. Химический энциклопедический словарь. М.: Сов. энциклопедия, 1983.
4. Лапшин Д.Н. Модифицирование огнетушащих порошковых составов на основе фосфата и сульфата аммония в условиях интенсивных механических воздействий: дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2014. 196 с.

Кошелева Ольга Эдуардовна, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Паули Ирина Анатольевна, канд. хим. наук, доц.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Николаев Никита Юрьевич, студ.; E-mail: nikolaevh13@mail.ru.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено 18.01.17

Kosheleva Ol'ga Eduardovna, DSc, Professor

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Pauli Irina Anatol'evna, PhD, Ass. Professor

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Nikolaev Nikita Yur'evich, Post-graduate Student; E-mail: nikolaevh13@mail.ru.

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

STUDY OF THE THERMAL DESTRUCTION OF WOOD AFTER WORKING BY THE CHEMICAL REAGENTS

Laws governing the thermal processes, proceeding with heating of the samples of the wood of two species (birch and pine tree) are investigated. The comparative analysis of the

influence of preliminary chemical woodworking by different reagents on its stability to the action of high temperatures is carried out.

Keywords: the wood of pine tree and birch, thermal analysis, the fireproofing compounds.

REFERENCES

1. Korol'chenko A.Ya., Petrova E.A. Sovremennye sredstva ognezashchity drevesiny [Contemporary means of fire protection of wood]. Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal [Russian chemical periodical]. 2003. No. 4.
<http://bent.ru/modules/Articles/article.php?storyid=357>. (in Russian)
2. Serkov B.B., ASEeva R.M., Sivenkov A.B. Fiziko-khimicheskie osnovy goreniya i pozharnaya opasnost' drevesiny. Ch. 1 [The physical chemistry bases of combustion and the fire hazard of wood, P. 1]. Internet-zhurnal «Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti» [Internet-periodical «The technology of the technosfernoy safety»]. 2011. No. 6 (40). Pp. 1–18. (in Russian) (<http://ipb.mos.ru/ttb>)
3. Khimicheskiy entsiklopedicheskiy slovar' [Chemical encyclopaedic dictionary]. Moscow, Soviet encyclopedia, 1983. (in Russian)
4. Lapschin D.N. Modifitsirovaniye ognetushashchikh poroshkovykh sostavov na osnove fosfata i sul'fata ammoniya v usloviyakh intensivnykh mekhanicheskikh vozdeystviy: dis. ... kand. tekhn. nauk [Modification of the fire-extinguishing powder compositions on the basis of phosphate and sulfate of ammonium under the conditions of the intensive mechanical actions: dis.... cand. tech. sciences]. Ivanovo, 2014. 196 p. (in Russian)

УДК 621.926

П.А. ХАХАЛЕВ, Н.Д. ВОРОБЬЕВ, В.С. БОГДАНОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОПОДВИЖНОГО ЯДРА МЕЛЮЩЕЙ ЗАГРУЗКИ В ШАРОВОЙ БАРАБАННОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Исследовано влияния шага и высоты выступов футеровки в зависимости от коэффициента загрузки и относительной частоты вращения барабанной мельницы на величину малоподвижного ядра мелющей загрузки в мельнице $0,48 \times 0,28$ м. Исследование проводилось в программном комплексе EDEM Simulation. Электронно-цифровые модели корпуса мельницы получены в программном продукте NX. При создании симуляций учитывались свойства материалов, из которых изготовлены футеровка и мелющие тела, а их взаимодействия охарактеризованы коэффициентами восстановления, трения скольжения и трения качения. Результаты экспериментов в виртуальной среде представлены в графическом виде и подробно проанализированы. Приведена визуальная оценка движения шаровой загрузки в мельнице при различных значениях варьируемых параметров. Определен параметр, который характеризует размер малоподвижного ядра.

Ключевые слова: мельница, цемент, EDEM, симуляция, малоподвижное ядро, футеровка.

В Российской Федерации в настоящее время насчитывается 47 цементных заводов. В технологической цепи каждого из них имеется шаровая мельница. Одним из направлений совершенствования шаровых мельниц является создание энергообменных футеровок [1, 2]. Любое проектирование связано с расчетами, экспериментами, подбором рациональных параметров и режимов процесса измельчения. Существует большое многообразие программных продуктов, используемых для проектирования оборудования [3]. Отдельную группу компьютерных программ составляют расчетные пакеты для вычисления симуляций движения материалов внутри заданного объема [4].

EDEM Simulation – программный комплекс на основе метода дискретных элементов. Он позволяет симулировать движение частиц любой формы в некотором ограниченном пространстве¹. Взаимодействие упругих тел определяется с помощью контактной модели, основанной на теориях Р. Миндлина и Г. Герца [5, 6].

Вычисление новой симуляции в программном комплексе EDEM начинается с подготовки геометрической модели футеровки. Корпус мельницы $\varnothing 0,48 \times 0,28$ м имеет сложную геометрию (рис. 1), поэтому электронно-цифровые модели ее различных вариантов исполнения были созданы в CAD-системе NX от компании Siemens PLM Software. С помощью универсального формата Parasolid они были импортированы в среду EDEM².

¹ Официальный сайт фирмы DEM Solutions LTD: [web-сайт]. URL: <http://www.dem-solutions.com> (дата обращения: 27.11.2016).

² EDEM User Manual, Copyright © 2002–2016 DEM Solutions.

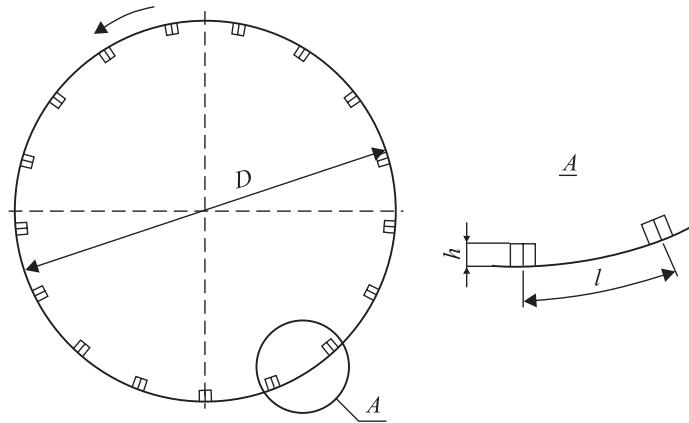


Рис. 1. Схема корпуса мельницы для построения цифровой модели

D – внутренний диаметр мельницы; h – высота выступа; l – шаг выступа

В симуляции учитывались свойства материалов шаров и футеровки (таблица). Взаимодействие тел характеризовалось следующими параметрами (сталь по стали) – коэффициентом восстановления (0,555), коэффициентом трения скольжения (0,74) и коэффициентом трения качения (0,002) [7–9].

Основные характеристики материалов

Параметр	Материал мелющих тел	Материал футеровки
	сталь ШХ-15	сталь 35Л
Коэффициент Пуассона	0,26	0,29
Плотность, кг/м ³	7812	7830
Модуль сдвига, Па	$8 \cdot 10^{10}$	$8,2 \cdot 10^{10}$

При диаметре мелющих тел 30 мм их количество при коэффициенте загрузки $\varphi = 0,3$ составляло 642 шт. Рабочая частота вращения мельницы была рассчитана по известным методикам и равнялась 46,2 об./мин [10–12].

Для определения количественной характеристики малоподвижного ядра с помощью компьютерной модели в среде EDEM были рассчитаны значения максимальных и средних скоростей шаров при различных значениях входных параметров и сопоставлены с визуальной картиной движения шаровой загрузки. В результате для характеристики малоподвижного ядра предложен количественный параметр C_k , позволяющий определить размер малоподвижного ядра шаровой загрузки. Параметр C_k равен проценту мелющих тел, обладающих скоростью менее 30 % от средней скорости $v_{ср}$ мелющих тел при установленвшемся режиме работы мельницы. С помощью модуля анализа полученных результатов EDEM Analyst были построены гистограммы распределения мелющих тел по линейной скорости в моменты времени 7, 7,5 и 8 с и экспортированы в формат данных *.csv. Затем, с помощью макроса, созданного в Microsoft Excel, производилось вычисление параметра C_k .

Исследования проводились в лаборатории САПР кафедры «Механического оборудования» Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, целью которых было уменьшение размера малоподвижного ядра при сохранении других показателей работы мельницы на прежнем уровне.

На рис. 2 представлены зависимости C_k от относительной частоты вращения при средних показателях коэффициента загрузки и высоты выступов.

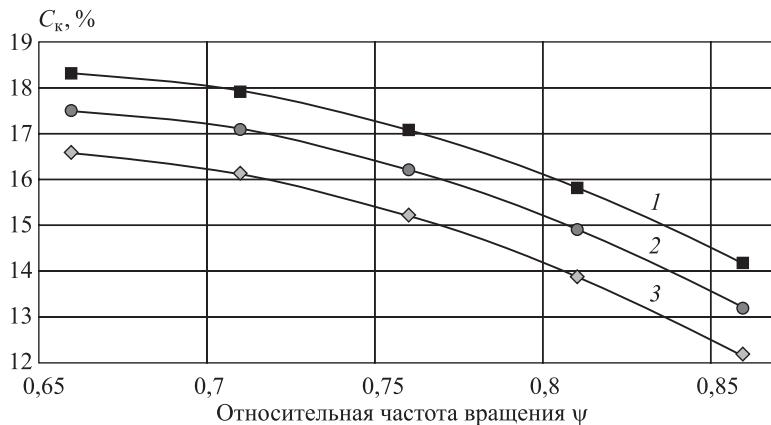


Рис. 2. Зависимости C_k от ψ при $\varphi = 0,3$ и $h = 16$ мм
1 – $l = 37,5^\circ$ (9 шт.); 2 – $l = 30^\circ$ (12 шт.); 3 – $l = 22,5^\circ$ (16 шт.)

Уменьшение C_k с ростом ψ объясняется тем, что с увеличением относительной частоты вращения ψ характер движения шаровой загрузки становится водопадным, что влечет повышение скоростей шаров. При увеличении относительной частоты вращения с 0,66 до 0,86 величина C_k снижается с 17,5 до 13,2 %. С увеличением шага между выступами с 22,5 до $37,5^\circ$ величина C_k возрастает с 15,2 до 17,1% при $\psi = 0,76$. Таким образом, относительная частота вращения является весомым фактором, существенно влияющим на величину малоподвижного ядра.

На рис. 3 представлены зависимости C_k от коэффициента загрузки мельницы φ при средних значениях шага и высоты выступов, которые носят экстремальный характер. Увеличение коэффициента загрузки с 0,26 до 0,35 приводит к снижению C_k с 16,4 до 15,2 %. Последующее повышение коэффициента загрузки до $\varphi = 0,4$ (при $\psi = 0,76$, $l = 30^\circ$ и $h = 16$ мм) вызывает снижение значения до $C_k = 13,5 \%$.

На рис. 4 показаны зависимости $C_k = f(l)$, которые являются монотонно возрастающими, однако наибольший угол подъема наблюдается при высоте выступа, равной 12 мм. При увеличении шага выступов с 15 до 45° количество шаров, находящихся в малоподвижном ядре, увеличивается с 14,05 до 17,8 % соответственно.

В результате численных экспериментов установлено, что при высоте выступов $h = 12$ мм и $h = 16$ мм величина ядра шаровой загрузки одинакова, а количество шаров, находящихся в ядре, равно 16,2 % от общего количества.

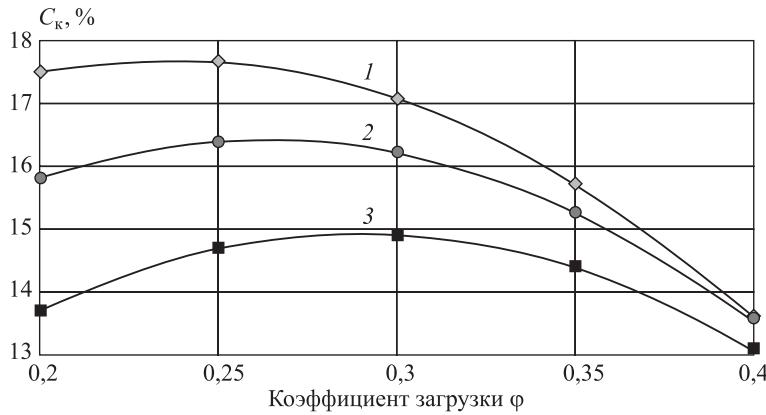


Рис. 3. Зависимости C_k от φ при $l = 30^\circ$ и $h = 16$ мм
1 – $\psi = 0,66$; 2 – $\psi = 0,76$; 3 – $\psi = 0,86$

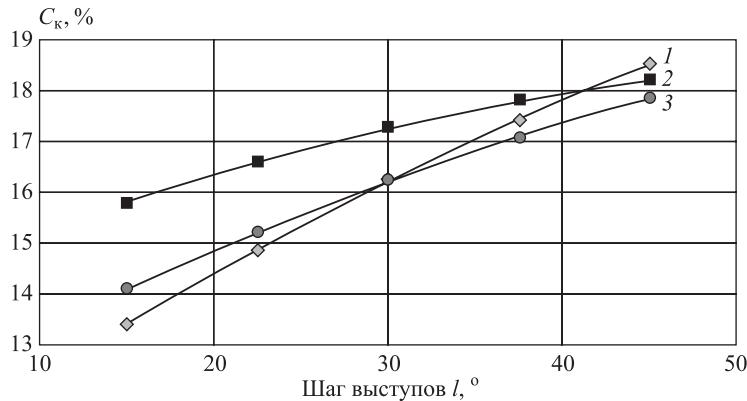


Рис. 4. Зависимости C_k от l при $\varphi = 0,3$ и $\psi = 0,76$
1 – $h = 20$ мм; 2 – $h = 16$ мм; 3 – $h = 12$ мм

ва мелющих тел. Это подтверждается визуальной оценкой характера движения загрузки в корпусе мельницы (рис. 5).

Зависимости $C_k = f(h)$, как следует из графиков (рис. 6), имеют экстремум.

При увеличении высоты выступов с 8 до 14 мм наблюдается уменьшение C_k при любом коэффициенте загрузки мельницы. Например, при коэффициенте загрузки барабана мельницы, равном 0,3, C_k уменьшается с 17,2 до 16,05 %. Однако при увеличении высоты выступов с 20 до 25 мм C_k резко возрастает с 17,2 до 19,2 %.

На значение зависимости $C_k = f(h)$ (см. рис. 6) также влияет и коэффициент загрузки. При любой высоте профиля выступа футеровки значение C_k выше при меньшей загрузке барабана мельницы. Так, при высоте выступа 16 мм значение C_k при коэффициенте загрузки $\varphi = 0,4$ равно 15,2 %, а при $\varphi = 0,2$ $C_k = 16,4$ %. Такие зависимости объясняются характером движения шаров в мельнице. При небольшой высоте выступов мелющие тела поднимаются на небольшую высоту и скатываются вниз (каскадный режим). По мере увеличения высоты лифтеров футеровки характер движения мелющих тел в барабане меняется, переходя в водопадный режим. Малоподвижное ядро растет, на что указывает увеличение C_k . При средних значениях высоты выступа ядро загрузки минимально.

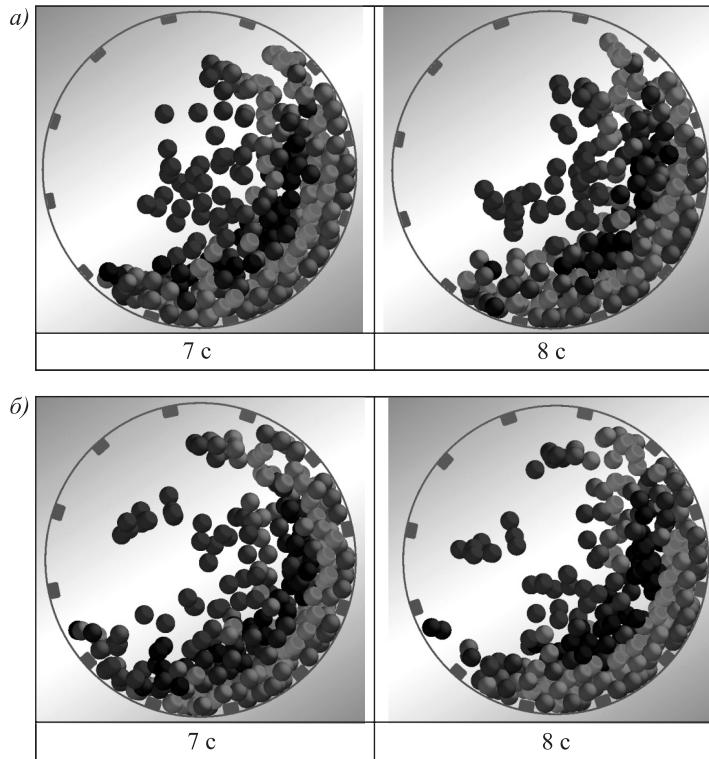


Рис. 5. Характер движения мельющей загрузки на 7 и 8 с соответственно
 $\alpha - \varphi = 0,3$, $\psi = 0,76$, $l = 30^\circ$, $h = 12$ мм; б – $\varphi = 0,3$, $\psi = 0,76$, $l = 30^\circ$, $h = 16$ мм

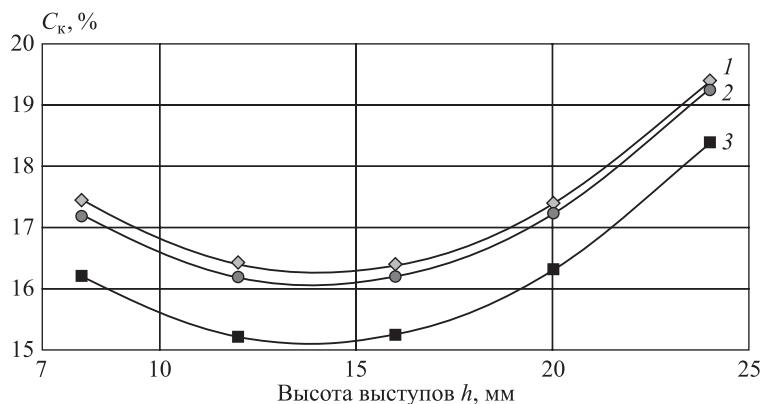


Рис. 6. Зависимости C_k от h при $\psi = 0,76$ и $l = 30^\circ$

I – $\varphi = 0,2$; 2 – $\varphi = 0,3$; 3 – $\varphi = 0,4$

Полученные данные позволили изучить влияние шага и высоты выступа, а также коэффициента загрузки и относительной частоты вращения мельницы на величину малоподвижного ядра шаровой загрузки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Kroger H., Ramesohl H. Innovation through tradition // World Cement. 2003. Nov. P. 157–159.

2. Worrell E., Martin N., Price L. Potentials for energy efficiency improvement in the cements industry // Energy. 2000. No. 12. P. 1189–1214.
3. Воробьев Н.Д. Моделирование процесса измельчения в шаровых мельницах // Горный журн. 2004. № 5. С. 65–68.
4. Богданов В.С., Фадин Ю.М., Хахалев П.А., Богданов Н.Э. Обзор исследований в области симуляции движения шаровой загрузки в мельницах // Интерстроймех-2015: Материалы Междунар. науч.-техн. конф. Казань: Изд-во Казан. гос. архит.-строит. ун-та, 2015. С. 78–80.
5. Mishra B.K., Rajamani R.K. The discrete element method for the simulation of ball mills // Appl. Math. Model. 1992. No. 16. P. 598–604.
6. Mishra B.K., Rajamani R.K. Simulation of charge motion in ball mills: P. 1. Experimental verifications // Int. J. Miner. Process. 1994. P. 171–186.
7. Богданов В.С., Хахалев П.А. Методика проектирования энергообменных футеровок шаровых барабанных мельниц // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. № 1. С. 67–72.
8. Ельцов М.Ю., Тимофеева О.А., Козлов А.А. Исследование эффективности режимов работы шаровых барабанных мельниц в зависимости от конструктивных параметров в программном комплексе EDEM // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвуз. сб. ст. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2011. С. 96–101.
9. Bogdanov V.S., Khakhalev P.A., Bogdanov N.E. The application of EDEM software for calculation design parameters of ball mill lining // Research Journal of Applied Sciences. Medwell Journals. 2014. No. 9(11). P. 869–873.
10. Крюков Д.К. Футеровка шаровых мельниц. М.: Машиностроение, 1965. 184 с.
11. Олевский В.А. Размольное оборудование обогатительных фабрик: справ. пособие по конструкциям, расчету и эксплуатации шаровых и стержневых мельниц. М.: Госгортехиздат, 1963. 448 с.
12. Тонкое измельчение в шаровых мельницах. URL: http://samlit.com/izmel/sharovye_sterzhnevye_melnicy-principy_raboty.htm (дата обращения: 27.11.2016).

Хахалев Павел Анатольевич, ассист.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Воробьев Николай Дмитриевич, канд. техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Богданов Василий Степанович, д-р техн. наук, проф.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено 01.12.16

Khakhalev Pavel Anatol'evich, Teaching Assistant

Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Vorob'ev Nikolay Dmitrievich, PhD, Professor

Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

Bogdanov Vasiliy Stepanovich, DSc, Professor

Belgorod Shukhov State Technological University, Russia

RESEARCH OF SEDENTARY CORE OF GRINDING LOADING IN BALL MILL

The article researched the impact of pitch and height of the lining, depending on the load factor and the relative rotation frequency of the mill drum by the amount of sedentary core in the mill 0,48x0,28 m. The research was performed in the software package EDEM

Simulation. Electronic digital models of the mill housing created in the software NX. In simulations considered the properties of the materials from which made lining and grinding bodies. Their interaction characterized the coefficients of recovery, of static friction and rolling friction. The results are presented in a graphic form. Shown visual motion of grinding media in the mill at different values of variable parameters. Determined the parameters that characterize the size of an sedentary core.

Key words: mill, cement, EDEM, simulation, sedentary core, lining.

REFERENCES

1. Kroger H., Ramesohl H. Innovation through tradition. World Cement. 2003. Nov. Pp. 157–159.
2. Worrell E., Martin N., Price L. Potentials for energy efficiency improvement in the cements industry. Energy. 2000. No. 12. Pp. 1189–1214.
3. Vorob'ev N.D. Modelirovaniye protsessov izmel'cheniya v sharovykh mel'nitsakh [Simulation of the grinding process in a ball mill]. Gornyy zhurnal [Mining journal]. 2004. No. 5. Pp. 65–68. (in Russian)
4. Bogdanov V.S., Fadlin Yu.M., Khabchalev P.A., Bogdanov N.E. Obzor issledovaniy v oblasti simulyatsii dvizheniya sharovoy zagruzki v mel'nitsakh [The research review about the simulation of ball load motion in mills]. Interstroymekh-2015. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii [Interstroymeh 2015. Proceedings of the international scientific conference]. Kazan', Publishing house of Kazan State Architectural University, 2015. Pp. 78–80. (in Russian)
5. Mishra B.K., Rajamani R.K. The discrete element method for the simulation of ball mills. Appl. Math. Model. 1992. No. 16. Pp. 598–604.
6. Mishra B.K., Rajamani R.K. Simulation of charge motion in ball mills: P. 1. Experimental verifications. Int. J. Miner. Process. 1994. Pp. 171–186.
7. Bogdanov V.S., Khabchalev P.A. Metodika proektirovaniya energoobmennykh futerovok sharovykh barabannykh mel'nits [Methods of designing energy-exchange liners ball mill drum]. Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova [Bulletin BSTU named after V.G. Shukhov]. 2014. No. 1. Pp. 67–72. (in Russian)
8. El'tsov M.Yu., Timofeeva O.A., Kozlov A.A. Issledovanie effektivnosti rezhimov raboty sharovykh barabannykh mel'nits v zavisimosti ot konstruktivnykh parametrov v programmnom komplekse EDEM [Analysis of modes efficiency in the tube ball mills, depending on the design parameters in the software package EDEM]. Energosberegayushchie tekhnologicheskie kompleksy i oborudovanie dlya proizvodstva stroitel'nykh materialov: mezhvuzovskiy sbornik statey [Energy-saving technological systems and equipment for the production of building materials: Interuniversity collection of articles]. Belgorod, Publisher BSTU named after V.G. Shukhov, 2011. Pp. 96–101. (in Russian)
9. Bogdanov V.S., Khabchalev P.A., Bogdanov N.E. The application of EDEM software for calculation design parameters of ball mill lining. Research Journal of Applied Sciences. Medwell Journals. 2014. No. 9(11). Pp. 869–873.
10. Kryukov D.K. Futerovka sharovykh mel'nits [The lining of ball mills]. Moscow, Mashinostroenie, 1965. 184 p. (in Russian)
11. Olevskiy V.A. Razmol'noe oborudovanie obogatitel'nykh fabrik: spravochnoe posobie po konstruktsiyam, raschetu i ekspluatatsii sharovykh i sterzhnevyykh mel'nits [Grinding Equipment concentrating factories: a handbook on the designs, calculations and operation of ball and rod mills]. Moscow, Gosgortekhizdat, 1963. 448 p. (in Russian)
12. Tonkoe izmel'chenie v sharovykh mel'nitsakh [Website Fine grinding in ball mills]. Available at:
http://samlit.com/izmel/sharovye_sterzhnevye_melnicy-principy_raboty.htm
(date of access: 27.11.2016) (in Russian)

**ПРОГРАММНЫЙ ПРОДУКТ
ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ПРОЕКТНОЙ ГРУНТОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
ЗЕМСНАРЯДОВ С ВЫВОДОМ ГРУНТОНАСОСОВ
ИЗ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ И С РЕАЛИЗАЦИЕЙ РЕЗЕРВОВ
ШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ**

НГАСУ (Сибстрин) предлагает программный продукт для автоматизации процесса обоснования проектной грунтопроизводительности земснарядов с оптимизацией способов вывода грунтонасосов из возможных нештатных ситуаций, а также с реализацией кавитационного запаса грунтонасосов для увеличения грунтопроизводительности или глубины подводной разработки грунта (по приоритетности). Программный продукт не имеет аналогов, так как включает нетрадиционные методы решения актуальных инженерных научно-технических задач гидромеханизации.

Работа с программным продуктом облегчается наличием баз данных по серийно выпускаемым грунтовым (основное оборудование) и водяным (вспомогательное оборудование для эжектирования) насосам.

Программный продукт универсален, так как позволяет решать любые задачи, возникающие при обосновании проекта производства работ в области гидравлической разработки грунта и подачи его к месту укладки.

Главные преимущества предложения

1. Систематизированы штатные и нештатные ситуации в режимах работы грунтонасосов с оптимизацией способов вывода грунтонасосов из нештатных ситуаций.
2. Использован впервые разработанный и достоверный метод решения недeterminированного уравнения напора эжектора как во всасывающем, так и в напорном трубопроводах грунтонасосов.
3. Применен системный подход к расчетному обоснованию рабочей точки грунтонасosa в сети с трубопроводом, в том числе и при эжектировании гидротранспортной линии.
4. Доказаны высокие технико-экономические показатели принципиально новых способов вывода грунтонасосов из нештатных ситуаций «кавитация» и «дефицит напора».

630008 г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

E-mail:ntio@sibstrin.ru
Internet: www.sibstrin.ru / innovation
Тел.: +7 (383) 266 25 27; +7(383) 266 42 81

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**

№ 2 (698) 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*