

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ

МЕЖДУНАРОДНАЯ ОБЩЕСТВЕННАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ СОДЕЙСТВИЯ РАЗВИТИЮ
СТРОИТЕЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 9 (705)

Сентябрь 2017

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

В.Н. Азаров, д-р техн. наук, проф., ВГТУ, Волгоград
А.А. Афанасьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ МГСУ, Москва
А.А. Волков, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИУ МГСУ, Москва
В.А. Воробьев, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., МАДГТУ (МАДИ), Москва
В.Г. Гагарин, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИИСФ, Москва
М.А.о. Гаджиев, д-р техн. наук, проф., АУАС, Баку, Азербайджан
У. Гайсбауэр, д-р – инж., Институт аэрогазодинамики, Университет Штутгарт, Германия
В.В. Дегтярев, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
Й. Деспотович, PhD, проф., Университет Белграда, Сербия
В.Т. Ерофеев, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., НИ МордГУ им. Н.П. Огарева, Саранск
Г.В. Есаулов, акад. РААСН, д-р архитектуры, проф., МАРХИ, Москва
В.И. Жаданов, д-р техн. наук, проф., ОГУ, Оренбург
М. Иветич, PhD, проф., Университет Белграда, Сербия
В.А. Игнатьев, д-р техн. наук, проф., ВГТУ, Волгоград
В.И. Колчунов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., Юго-ЗапГУ, Курск
В.И. Костин, д-р техн. наук, проф. (заместитель главного редактора), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
Г.Б. Лебедев, канд. техн. наук, доц. (заместитель главного редактора), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
П. Либланг, д-р, проф., Высшая техническая школа, Университет прикладных наук, Кёльн, Германия
Л.С. Ляхович, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ТГАСУ, Томск
В.М. Митасов, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
В.И. Морозов, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург
Ж.С. Нуужинов, д-р техн. наук, проф., Казахстанский МИРР, Караганда, Казахстан
Ю.П. Панибратов, акад. РААСН, д-р экон. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург
Г.И. Пустоветов, чл.-кор. РААСН, д-р архитектуры, проф., НГУАДИ, Новосибирск
В.Г. Себешев, поч. чл. РААСН, канд. техн. наук, проф. (главный редактор), НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
Ю.Л. Сколубович, чл.-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск
Ю.А. Феофанов, д-р техн. наук, проф., СПбГАСУ, Санкт-Петербург
Й.В. Ху, PhD, проф., Национальный университет г. Инчхон, Республика Корея
Е.М. Чернышов, акад. РААСН, д-р техн. наук, проф., ВГТУ, Воронеж
Е.Ч. Шин, PhD, проф., Национальный университет г. Инчхон, Республика Корея

Ответственный секретарь Н.В. Биткина

Адрес редакции:

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

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ СООРУЖЕНИЙ

Игнатьев А.В., Игнатьев В.А., Гамзатова Е.А. Анализ изгибаемых пластинок, имеющих жесткие включения или отверстия, по МКЭ в форме классического смешанного метода	5
---	---

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ.

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ

Адищев В.В., Мальцев В.В., Данилов М.Н. Верификация численно-аналитического метода определения прогибов с помощью численного моделирования	15
Смирнов А.В., Баженова А.Ю., Демин А.С. О критериях динамической прочности проезжей части автомобильных дорог	25
Ланис А.Л., Воробьев В.С., Разуваев Д.А., Ломов П.О. Определение несущей способности набивной сваи по грунту, выполненной в раскатанной скважине	31

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Ильина Л.В., Гичко Н.О., Теплов А.Н., Туляганов А.К. Изменение структуры и пористости цементного камня при введении дисперсного известняка	41
Траутвайн А.И., Яковлев Е.А., Силко А.А. Взаимосвязь деформативной устойчивости асфальтобетонных покрытий и основных свойств органических вяжущих материалов	50

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА

Гириков О.Г. К оптимизации системы усреднитель–реактор в схемах очистки производственных сточных вод	60
Кочев А.Г., Соколов М.М., Кочева Е.А., Жарнаков А.С. Анализ применения энергосберегающих технологий в православных храмах	70

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Воробьев В.С., Боброва Т.В., Попов А.М., Попова Ю.В. Управление поставками полипродукта при реализации строительных проектов в зонах индустриального освоения	79
---	----

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКОЛОГИИ

Копылова Т.А. Теоретическое обоснование шкалы уровней обслуживания интермодальных узлов городского общественного пассажирского транспорта ..	91
--	----

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

Королев К.В., Карапулов А.М., Галтер Д.С. Инженерная методика расчета вертикально армированных оснований	101
Преловская Е.С., Левашев А.Г., Михайлов А.Ю., Кламер М. Совершенствование методики проектирования улично-дорожных сетей российских городов	109

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE
OF RUSSIAN FEDERATION

INTERNATIONAL PUBLIC ORGANIZATION
“ASSOCIATION OF EDUCATIONAL
CIVIL ENGINEERING INSTITUTIONS”

NEWS OF HIGHER EDUCATIONAL
INSTITUTIONS

CONSTRUCTION

No. 9 (705)
September 2017

Scientific-theoretical journal
Published since March 1958
Monthly

EDITORIAL BOARD

- V.N. Azarov, DSc (Eng), Prof., Volgograd, Russia
A.A. Afanas'yev, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow, Russia
A.A. Volkov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow, Russia
V.A. Vorob'yov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow, Russia
V.G. Gagarin, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Moscow, Russia
M.A.o. Hajiyev, DSc (Eng), Prof., Baku, Azerbaijan
U. Gaisbauer, Dr. – Ing., Institut für Aerodynamik und Gasdynamik, Universität Stuttgart, Germany
V.V. Degtyarev, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk, Russia
J. Despotović, PhD, Prof., University of Belgrad, Serbia
V.T. Erofeev, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Saransk, Russia
G.V. Esaulov, Acad. RAACS, DSc (Architecture), Prof., Moscow, Russia
V.I. Zhadanov, DSc (Eng), Prof., Orenburg, Russia
M. Ivetić, PhD, Prof., University of Belgrad, Serbia
V.A. Ignat'yev, DSc (Eng), Prof., Volgograd, Russia
V.I. Kolchunov, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Kursk, Russia
V.I. Kostin, DSc (Eng), Prof. (*Deputy Edinor-in-Chief*), Novosibirsk, Russia
G.B. Lebedev, PhD, Ass. Prof. (*Deputy Edinor-in-Chief*), Novosibirsk, Russia
P. Lieblang, Dr., Prof., Technische Hochschule, Köln, Germany
L.S. Lyakhovich, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Tomsk, Russia
V.M. Mitasov, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk, Russia
V.I. Morozov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Saint-Petersburg, Russia
Zh. S. Nuguzhinov, DSc (Eng), Prof., Karaganda, Republic of Kazakhstan
Yu.P. Panibratov, Acad. RAACS, DSc (Econ), Prof., Saint-Petersburg, Russia
G.I. Pustovetov, Corr. Mem. RAACS, DSc (Architecture), Prof., Novosibirsk, Russia
V.G. Sebeshev, Honour. Mem. RAACS, PhD, Prof. (*Edinor-in-Chief*), Novosibirsk, Russia
Yu.L. Skolubovich, Corr. Mem. RAACS, DSc (Eng), Prof., Novosibirsk, Russia
Yu.A. Feofanov, DSc (Eng), Prof., Saint-Petersburg, Russia
Jong Wan Hu, PhD, Prof., Incheon National University, Republic of Korea
Ye.M. Chernyshov, Acad. RAACS, DSc (Eng), Prof., Voronezh, Russia
Eun Chul Shin, PhD, Prof., Incheon National University, Republic of Korea

Responsible secretary N.V. Bitkina

The editorial office's address:

113 Leningradskaya St. Novosibirsk 630008 Russia
Phone number +7 (383) 266 28 59
www.izvuzstr.sibstrin.ru
E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

CONTENTS

THEORY OF STRUCTURES

Ignatyev A.V., Ignatyev V.A., Gamzatova E.A. Analysis of bending problem of plates with rigid inclusions or holes by the fem in the form of a classical mixed method	5
--	---

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND STRUCTURES.

BASES AND FOUNDATIONS

Adishchev V.V., Maltsev V.V., Danilov M.N. Verification of numerical-analytical method for determining deflection by numerical simulation	15
Smirnov A.V., Bazhenova A.Yu., Demin A.S. About the criteria for the dynamic strength of the roadway of highway	25
Lanis A.L., Vorob'ev V.S., Razuvayev D.A., Lomov P.O. Determining the cast-in-situ pile resistance performed in the unrolled well	31

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

Il'ina L.V., Gichko N.O., Teplov A.N., Tulyaganov A.K. Changes of the structure and percussion of cement stone at the introduction of the disperse limestone	41
Trautvain A.I., Yakovlev E.A., Silko A.A. The interrelation of the deformational stability of asphalt concrete coatings and the main properties of organic binding materials	50

LIFE MAINTENANCE ENGINEERING SYSTEMS

OF THE INHABITED LOCALITIES, BUILDINGS AND STRUCTURES. ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION

Girikov O.G. To optimize the system equalization tank-reactors in the scheme of clearing of industrial sewage	60
Kochev A.G., Sokolov M.M., Kocheva E.A., Zharnakov A.S. Analysis of the application of energy saving technologies in orthodox churches	70

TECHNOLOGY AND ORGANIZATION OF CONSTRUCTION

Vorob'ev V.S., Bobrova T.V., Popov A.M., Popova Yu.V. Supply management product at the time of implementation of construction projects in the areas of industrial development	79
---	----

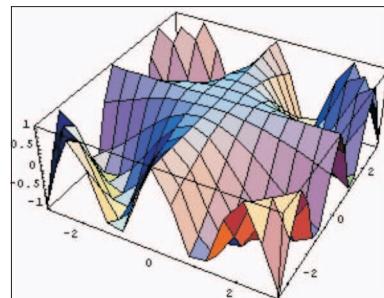
SCIENTIFIC PROBLEMS OF ARCHITECTURE, TOWN PLANNING AND ECOLOGY

Kopylova T.A. Scientific justification of level of service scale of intermodal passenger transport junction	91
---	----

SECTION OF SCIENTIFIC METHODOLOGY

Korolev K.V., Karaulov A.M., Galter D.S. Engineering design procedure of vertically reinforced bases	101
Prelovskaya E.S., Levashov A.G., Mikhaylov A.Yu., Klamer M. Development of complete street design approach for russian cities	109

ТЕОРИЯ СООРУЖЕНИЙ



УДК 624.073.042

А.В. ИГНАТЬЕВ, В.А. ИГНАТЬЕВ, Е.А. ГАМЗАТОВА

АНАЛИЗ ИЗГИБАЕМЫХ ПЛАСТИНОК, ИМЕЮЩИХ ЖЕСТКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ ИЛИ ОТВЕРСТИЯ, ПО МКЭ В ФОРМЕ КЛАССИЧЕСКОГО СМЕШАННОГО МЕТОДА*

Излагается алгоритм расчета изгибаемых пластинок, имеющих жесткие включения или отверстия прямоугольной формы, основанный на применении развиваемого авторами метода конечных элементов (МКЭ) в форме классического смешанного метода, альтернативного по отношению к МКЭ в перемещениях. Эффективность алгоритма проиллюстрирована на примерах расчета. Показано, что расчет по этой форме МКЭ позволяет получить более точную картину напряженно-деформированного состояния пластинки, в особенности в угловых зонах жестких включений и отверстий, где возникает концентрация напряжений (моментов). Предлагаемый алгоритм дает возможность за счет рассмотрения его как единого конечного элемента значительно уменьшить порядок разрешающей системы алгебраических уравнений.

Ключевые слова: изгибающая пластинка, жесткие включения, отверстия, МКЭ в форме классического смешанного метода.

Жесткое включение. Несмотря на довольно большое количество работ, посвященных проблеме учета смещений конечного элемента как жесткого целого [1–8], она остается актуальной. В данной работе эта проблема решается в рамках разрабатываемого авторами метода конечных элементов (МКЭ) в форме классического смешанного метода. В [4] показано, что при использовании стержневых конечных элементов и треугольных КЭ-пластинок проблема учета смещений КЭ как жесткого целого снимается автоматически. В прямоугольных изгибающихся конечных элементах при смещениях связей в основной системе происходит его деформация. Однако и эта основная система позволяет без затруднения решить проблему исключения из разрешающей системы уравнений смещений КЭ как жесткого целого [5].

Рассмотрим пример расчета изгибающей пластинки с одним жестким включением в виде абсолютно жесткого тела прямоугольного в плане со сторонами, параллельными осям координат (рис. 1, а).

Геометрическое положение жесткого включения в деформированной изогнутой пластинке, т.е. перемещения (линейные и угловые) всех узлов

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ. Проект № 16-41-340558/2016.

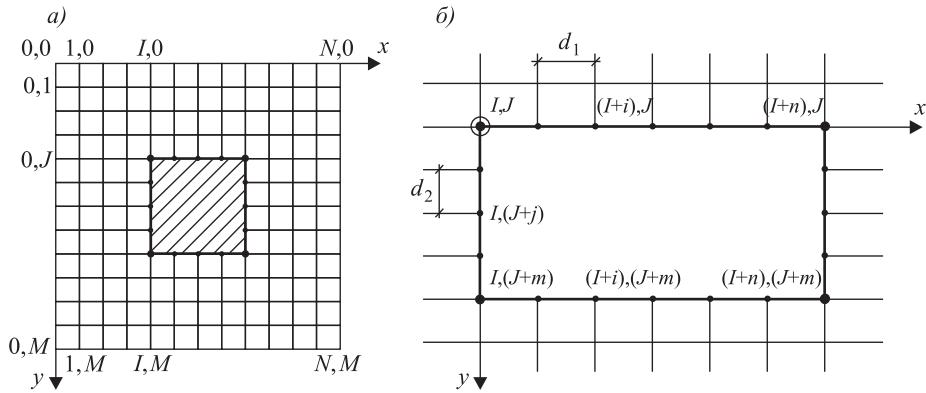


Рис. 1

абсолютно жесткой вставки выражаются через три параметра, характеризующих положение вставки в пространстве:

$$\text{а) } q_{IJ}, \varphi_{IJ}^{(y)}, \varphi_{IJ}^{(x)} \text{ или б) } q_{IJ}, q_{I+n,J}, q_{I,J+m}.$$

Варианты а) и б) связаны зависимостями:

$$\begin{aligned} \varphi_{IJ}^{(x)} &= \frac{q_{I,J+m} - q_{IJ}}{mb}, \quad \varphi_{IJ}^{(y)} = \frac{q_{I+n,J} - q_{IJ}}{na}, \\ q_{I+n,J} &= q_{IJ} + \varphi_{IJ}^{(y)}(na), \quad q_{I,J+m} = q_{IJ} + \varphi_{IJ}^{(x)}(mb). \end{aligned} \quad (1)$$

Все разрешающие уравнения могут быть записаны соответственно в двух вариантах.

На рис. 1, б приведена нумерация узлов на контуре жесткого включения, привязанная к нумерации узлов конечно-элементной сетки. На рис. 2 показана необходимая для составления разрешающих уравнений нумерация конечных элементов, примыкающих к произвольному узлу IJ за пределами контура включения (рис. 2, а), и нумерация неизвестных в основной системе для конечного элемента (рис. 2, б).

Разрешающая система уравнений МКЭ в форме классического смешанного метода имеет следующий вид [4]

$$\begin{Bmatrix} R \\ \Delta \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} r & \tilde{r} \\ \delta & \tilde{\delta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ \tilde{q} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} r_p \\ \delta_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

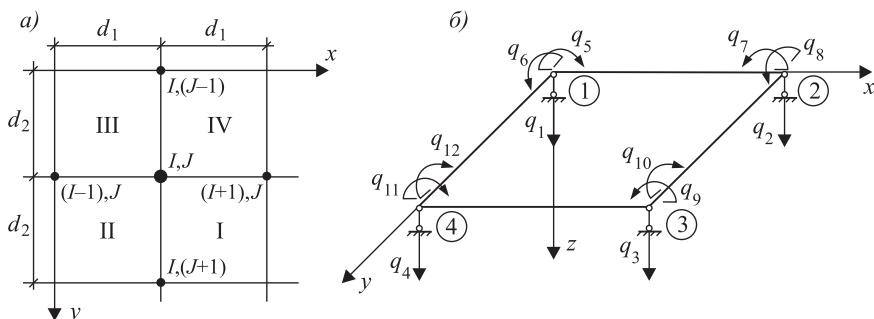


Рис. 2

Приняты следующие обозначения для основных неизвестных:

q_1, q_2, q_3, q_4 – прогибы в узлах 1, 2, 3, 4;

q_5, q_7, q_9, q_{11} – изгибающие моменты $M_x(x, y)$ в узлах 1, 2, 3, 4 соответственно;

q_6, q_8, q_{10}, q_{12} – изгибающие моменты $M_y(x, y)$ в тех же узлах.

В рассматриваемом узле IJ имеем следующие соотношения между параметрами перемещений и изгибающих моментов в примыкающих к нему конечных элементах:

$q_1^{(I)} = q_2^{(II)} = q_3^{(III)} = q_4^{(IV)}$ – для прогибов;

$\varphi_{I,J}^{(x),I} = \varphi_{I,J}^{(x),II} = \varphi_{I,J}^{(x),III} = \varphi_{I,J}^{(x),IV} = \varphi_{I,J}^{(x)}$ – для углов поворота сечений КЭ

относительно оси Ox ;

$\varphi_{I,J}^{(y),I} = \varphi_{I,J}^{(y),II} = \varphi_{I,J}^{(y),III} = \varphi_{I,J}^{(y),IV} = \varphi_{I,J}^{(y)}$ – для углов поворота сечений КЭ

относительно оси Oy ;

$q_5^{(I)} = q_7^{(II)}, q_9^{(III)} = q_{11}^{(IV)}$ – для изгибающих моментов $M_x(x, y)$;

$q_6^{(I)} = q_8^{(II)}, q_{10}^{(III)} = q_{12}^{(IV)}$ – для изгибающих моментов $M_y(x, y)$.

Построение разрешающих уравнений, относящихся к узлам IJ , расположенным между внешним и внутренним контуром пластиинки, рассмотрено в [4]. Там же приведены выражения для элементов матрицы откликов конечного элемента. Формально уравнения для узлов на контуре и в области жесткого включения составляются так же, как и для произвольного узла IJ вне области вставки. Нагрузка на площади жесткого включения распределяется по узлам ее контура.

Для узла IJ жесткого включения (см. рис. 1, б) получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} 1) R_{IJ}^H + R_2^H + R_3^H + R_4^H &= 0, \quad 2) (\Delta_9^{III} + \Delta_{11}^{IV}) + (\Delta_7^H + \varphi_{IJ}^{(y)}) = 0, \\ 3) (\Delta_8^H + \Delta_{10}^{III}) + (\Delta_{12}^{IV} + \varphi_{IJ}^{(x)}) &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

В ней, для того чтобы избежать в расчете накопления погрешности из-за операций с очень мелкими величинами φ_{IJ} , выполняется их замена выражениями (1) через линейные перемещения угловых узлов вставки.

Так как геометрическое положение жесткого включения в прямоугольной системе координат x, y, z определяется перемещениями только трех ее угловых узлов (см. рис. 2, б), то в глобальной системе разрешающих уравнений для пластиинки все кинематические неизвестные, относящиеся к узлам на контуре и в области жесткого включения, выражаются через перемещения q_1, q_2, q_4 этих угловых узлов:

$$q_{I+i, J+j} = q_1 \left(1 - \frac{i}{n} - \frac{j}{m} \right) + q_2 \left(\frac{i}{n} \right) + q_4 \left(\frac{j}{m} \right) \quad (4)$$

$$(i = 0, 1, \dots, n; \quad j = 0, 1, \dots, m).$$

Из этой зависимости получаются, как частный случай, соответствующие выражения для узлов на контуре жесткого включения при задании $i = 0$ или $i = n, j = 0$ или $j = m$.

Зависимость (4) представим в матричной форме, наиболее удобной для преобразования разрешающей системы уравнений (2):

$$\{q_{\text{ж}}\} = \begin{pmatrix} q_{\text{в}} \\ q_{\text{н}} \\ q_{\text{лев}} \\ q_{\text{пр}} \end{pmatrix} = [A_{IJ}] \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_4 \end{pmatrix}, \text{ где } [A_{IJ}] = \begin{pmatrix} \left(1 - \frac{i}{n}\right) & \left(\frac{i}{n}\right) & 0 \\ \left(-\frac{i}{n}\right) & \left(\frac{i}{n}\right) & 1 \\ \left(1 - \frac{j}{m}\right) & 0 & \left(\frac{j}{m}\right) \\ \left(-\frac{j}{m}\right) & 1 & \left(\frac{j}{m}\right) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

($i = 0, 1, \dots, n$; $j = 0, 1, \dots, m$) – матрица перехода (преобразования) от кинематических неизвестных во всех узлах контура, рассматриваемых как внутренние граничные, к неизвестным в углах контура, определяющим положение включения как жесткого целого.

В общем случае при представлении всей области пластинки, включая жесткое включение, единой конечно-элементной сеткой:

$[A_{IJ}] = \left[\left(1 - \frac{i}{n} - \frac{j}{m}\right) \left(\frac{i}{n}\right) \left(\frac{j}{m}\right) \right]$ – матрица перехода или преобразований всех

кинематических неизвестных в области жесткой вставки.

В соответствии с этим представим вектор кинематических неизвестных $\{q\}$ в разрешающей системе уравнений в виде двух подвекторов, т.е.

$$\{q\} = [q_I \ q_{II}]^T, \quad (6)$$

где $\{q_I\} = \{q_{I+i, J+j}\}$, $\{q_{II}\}$ – вектор неизвестных в остальных узлах вне контура жесткой вставки.

Для преобразования входящего в разрешающую систему уравнений вектора r_p рассмотрим реакцию r_p в произвольном узле ($I+i, J+j$) жесткой вставки как нагрузку и найдем из условий равновесия реакции от нее в узлах 1, 2, 4 основной статически определимой системы для жесткой вставки

$$r_2 = -r_p \frac{i}{n}, \quad r_4 = -r_p \frac{j}{m}, \quad r_1 = -r_2.$$

Суммируя воздействия по всем узлам области вставки, получаем:

$$\begin{aligned} r_{2,p}^{(\text{вст})} &= r_{I+n,J} = - \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m (r_{p,(J+j,J+j)}) \left(\frac{i}{n}\right), \quad r_{1,p}^{(\text{вст})} = -r_{2,p}^{(\text{вст})}, \\ r_{4,p}^{(\text{вст})} &= r_{I,J+m} = - \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^n (r_{p,(J+j,J+j)}) \left(\frac{j}{m}\right). \end{aligned} \quad (7)$$

Для иллюстрации предлагаемых алгоритмов на основе МКЭ в форме классического смешанного метода выполнены расчеты шарнирно опертой по контуру пластинки:

- а) с жестким включением прямоугольной формы со сторонами, параллельными сторонам пластинки;
- б) с отверстием такой же прямоугольной формы.

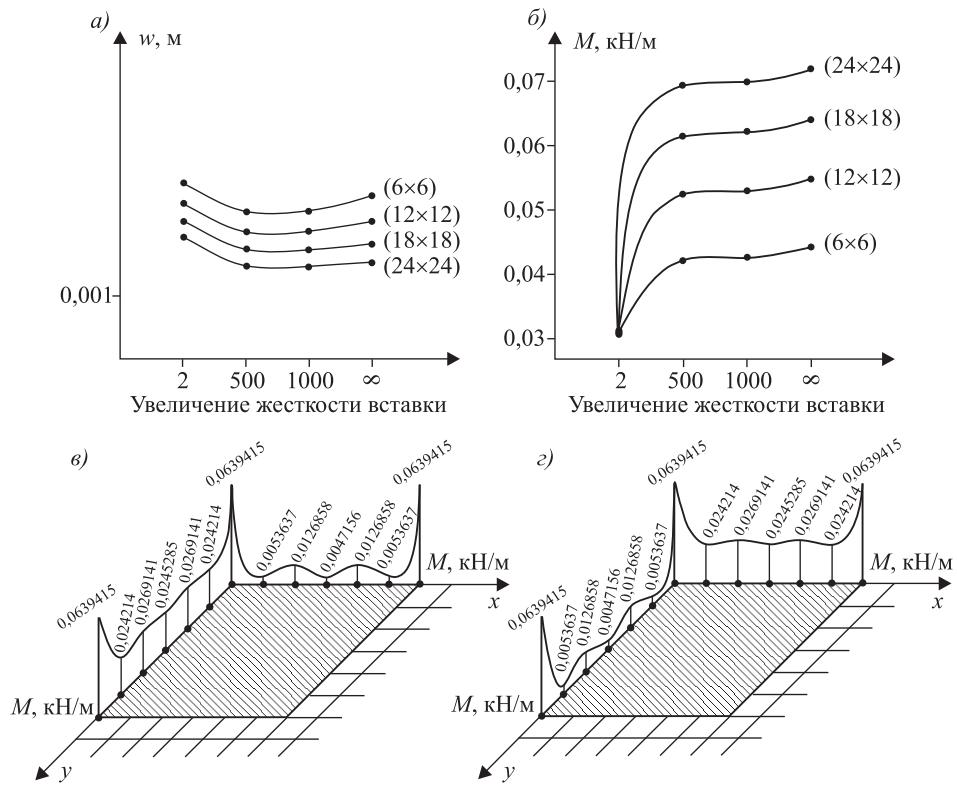


Рис. 3

На рис. 3 приведены графики изменения прогибов и изгибающих моментов в угловых точках жесткого включения (вставки) в зависимости от коэффициентов увеличения жесткости конечных элементов включения. Для случая абсолютно жесткого включения в качестве граничных условий используются условия на контуре включения, выражающие перемещения узлов на контуре через три перемещения включения как абсолютно жесткого тела.

В табл. 1 приведены соответствующие численные результаты. Для сравнения в них же показаны результаты расчета с использованием ПК ЛИРА-САПР.

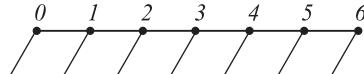
Таблица 1. Значения моментов M_x/M_y в узлах на кромке жесткого квадратного симметричного включения

Показатель	Узел				
	0	1	2	3	4
Увеличение жесткости включения в 1000 раз	$\frac{0,0528003}{0,0528003}$	$\frac{-0,0013975}{0,0293264}$	$\frac{0,0154761}{0,0286309}$	$\frac{-0,0013975}{0,0293264}$	$\frac{0,0528003}{0,0528003}$
Абсолютно жесткое включение	$\frac{0,0473646}{0,0473646}$	$\frac{0}{0,0540278}$	$\frac{0}{0,0285276}$	$\frac{0}{0,0540278}$	$\frac{0,0473646}{0,0473646}$

Окончание табл. 1

Решение ПК ЛИРА	$\frac{0,0378305}{0,0378305}$	$\frac{0,0167902}{0,0364982}$	$\frac{0,0101641}{0,0310212}$	$\frac{0,0167902}{0,0364982}$	$\frac{0,0378305}{0,0378305}$
-----------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------

Сетка 18×18 , схема расположения узлов:



Показатель	Узел						
	0	1	2	3	4	5	6
Увеличение жесткости включения в 1000 раз	$\frac{0,0619342}{0,0619342}$	$\frac{-0,0014288}{0,031304}$	$\frac{0,0130633}{0,0280186}$	$\frac{0,0054305}{0,0264357}$	$\frac{0,0130633}{0,0280186}$	$\frac{-0,0014288}{0,031304}$	$\frac{0,0619342}{0,0619342}$
Абсолютно жесткое включение	$\frac{0,0553253}{0,0553253}$	$\frac{0}{0,0583592}$	$\frac{0}{0,0289407}$	$\frac{0}{0,0317048}$	$\frac{0}{0,0289407}$	$\frac{0}{0,0583592}$	$\frac{0,0553253}{0,0553253}$
Решение ПК ЛИРА	$\frac{0,0434851}{0,0434851}$	$\frac{0,0192547}{0,0401058}$	$\frac{0,0107435}{0,0316814}$	$\frac{0,0090207}{0,0294146}$	$\frac{0,0107435}{0,0316814}$	$\frac{0,0192547}{0,0401058}$	$\frac{0,0434851}{0,0434851}$

Отверстие. Расчет изгибающихся пластинок, ослабленных прямоугольными отверстиями или щелями [9 и др.], также может быть выполнен на основе МКЭ в форме классического смешанного метода.

Для изображения пластиинки с отверстием может быть использован рис. 1, на котором вместо жесткого включения будет та же область с нулевой жесткостью. Нумерация узлов конечно-элементной сетки, локальная нумерация узлов отверстия и смежных с ним КЭ показаны на рис. 2, а, б.

Алгоритм построения системы разрешающих уравнений для изгибающейся прямоугольной пластиинки и постановка граничных условий, изложенные

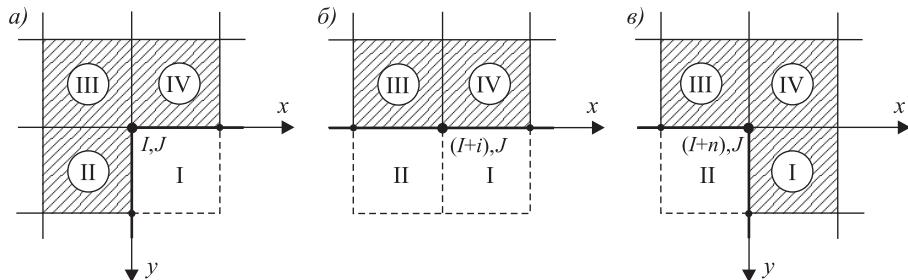


Рис. 4

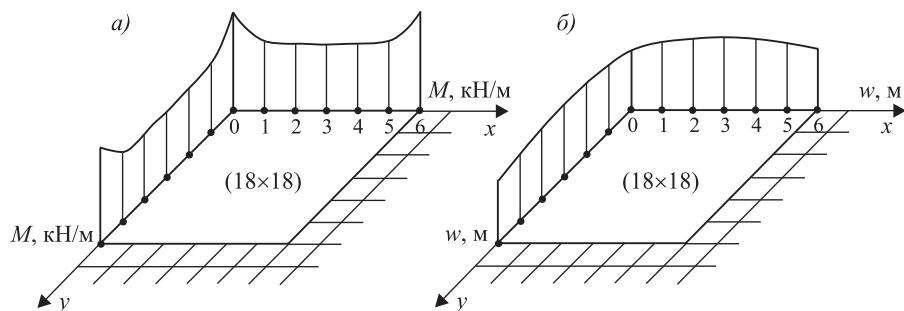


Рис. 5

в [4], используются и в рассматриваемом случае. В общих уравнениях в качестве граничных условий выступают условия в узлах на контуре отверстия, т.е. равенство нулю основных силовых неизвестных \tilde{q} , относящихся к конечному элементу, имеющему нулевую изгибную жесткость (рис. 4).

Структура разрешающих уравнений, относящихся к узлам на контуре отверстия, с учетом граничных условий приведена ниже.

Узел IJ (рис. 4, а):

$$1) R_{I,J} = R_2^{II} + R_3^{III} + R_4^{IV} = 0, \quad 2) \Delta_9^{III} + \Delta_{11}^{IV} = 0, \quad 3) \Delta_8^{II} + \Delta_{10}^{III} = 0, \quad (8)$$

в этих уравнениях $q_2^{II} = q_3^{III} = q_4^{IV}$, $q_7^{II} = 0$, $q_{12}^{IV} = 0$.

Узел $(I+i), J$ (рис. 4, б):

$$1) R_{(I+i),J} = R_3^{III} + R_4^{IV} = 0, \quad 2) \Delta_9^{III} + \Delta_{11}^{IV} = 0, \quad 3) \Delta_{10}^{III} + \Delta_{12}^{IV} = 0, \quad (9)$$

в этих уравнениях $q_3^{III} = q_4^{IV}$, $q_{10}^{III} = 0$, $q_{12}^{IV} = 0$.

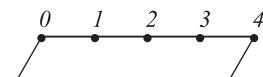
Узел $(I+n), J$ (рис. 4, в):

$$1) R_{(I+n),J} = R_1^I + R_3^{III} + R_4^{IV} = 0, \quad 2) \Delta_9^{III} + \Delta_{11}^{IV} = 0, \quad 3) \Delta_6^I + \Delta_{12}^{IV} = 0, \quad (10)$$

в этих уравнениях $q_1^I = q_3^{III} = q_4^{IV}$, $q_{10}^{III} = 0$, $q_5^I = 0$.

Таблица 2. Значения моментов и прогибов в узлах на кромке квадратного симметричного отверстия

Сетка 12×12 , схема расположения узлов:



Решение	Узел				
	0	1	2	3	4

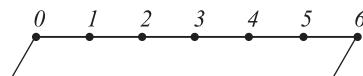
Величина прогиба в узлах на кромке отверстия

МКЭ КСМ	0,0038559	0,0043859	0,0045534	0,0043859	0,0038559
ПК ЛИРА	0,00374746	0,00428764	0,00445995	0,00428764	0,00374746

Величина момента в узлах на кромке отверстия

МКЭ КСМ	0,0557388	0,0414707	0,041163	0,0414707	0,0557388
ПК ЛИРА	0,0281528	0,0459029	0,0410237	0,0459029	0,0281528

Сетка 18×18 , схема расположения узлов:



Решение	Узел						
	0	1	2	3	4	5	6

Величина прогиба в узлах на кромке отверстия

МКЭ КСМ	0,0038289	0,0042267	0,0044534	0,004528	0,0044534	0,0042267	0,0038289
ПК ЛИРА	0,00376506	0,00416942	0,00440017	0,0044757	0,00440017	0,00416942	0,00376506

Величина момента в узлах на кромке отверстия

МКЭ КСМ	0,0618897	0,0444113	0,0427939	0,0418117	0,0427939	0,0444113	0,0618897
ПК ЛИРА	0,0308483	0,0503841	0,0437953	0,0419085	0,0437953	0,0503841	0,0308483

На рис. 5, а, б приведены графики изменения прогибов и изгибающих моментов для пластинки с сеткой КЭ (18×18) и прямоугольным отверстием в середине с размером $1/3$ от размера сторон пластиинки. В табл. 2 даны численные результаты для различных вариантов густоты сетки КЭ.

Выводы. 1. Расчеты пластинок с жесткими включениями или отверстиями по МКЭ в форме классического смешанного метода и по традиционному МКЭ в перемещениях с использованием ПК ЛИРА-САПР дают практически совпадающие результаты по прогибам и существенно отличающиеся результаты по моментам (напряжениям) в угловых зонах включений или отверстий.

2. Традиционный МКЭ не обеспечивает получение достоверной оценки НДС в угловых зонах пластиинки.

3. МКЭ в форме классического смешанного метода может быть использован как альтернативный для верификации результатов расчета с помощью других методов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голованов А.И., Тюленева О.Н., Шигабутдинов А.Ф. Метод конечных элементов в статике и динамике тонкостенных конструкций. М.: Физматлит, 2006. 391 с.
2. Гуреева Н.А., Ключков Ю.В., Николаев А.П. Учет смещения конечного элемента как жесткого целого в смешанной формулировке МКЭ // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений / Рос. ун-т дружбы народов. 2010. № 3. С. 47–53.
3. Железнов Л.П., Кабанов В.В. Функции перемещений конечных элементов оболочки вращения как твердых тел // Изв. АН СССР. МТТ. 1990. № 1. С. 131–136.
4. Ignat'ev A.V., Ignat'ev V.A. Modified algorithm for the analysis of thin plates by the finite element method in the form of the classical mixed method // Procedia Engineering. 2016. Т. 150. Рр. 1766–1770.
5. Кантин Г. Смещение криволинейных элементов как жесткого целого // Ракетная техника и космонавтика. 1970. № 7. С. 84–88.
6. Ленишин В.П. Расчет конструкций с нерегулярными отверстиями и вырезами методом неоднородных конечных элементов // Строительная механика и расчет сооружений. 1983. № 2. С. 21–24.
7. Масленников А.М. Расчет строительных конструкций численными методами. Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. 224 с.
8. Покровский А.А. О методе перемещений в МКЭ с отделением смещений твердого тела // Строительная механика и расчет сооружений. 2014. № 4. С. 2–4.
9. Дlugach M.I. Метод конечных элементов в применении к расчету цилиндрических оболочек с прямоугольными отверстиями // Прикл. механика. 1973. Т. 11, № 11. С. 35–41.

Игнатьев Александр Владимирович, канд. техн. наук, доц.;
E-mail: alignat70@yandex.ru

Институт архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического университета

Игнатьев Владимир Александрович, д-р техн. наук, проф.
Институт архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического университета

Гамзатова Елена Александровна, асп.

Институт архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического университета

Получено 21.08.17

Ignatyev Alexander Vladimirovich, PhD, Ass. Professor; E-mail: alignat70@yandex.ru
Institute of Architecture and Civil Engineering of Volgograd State Technical University,
Russia

Ignatyev Vladimir Alexandrovich, DSc, Professor
Institute of Architecture and Civil Engineering of Volgograd State Technical University,
Russia

Gamzatova Elena Alexandrovna, Post-graduate Student
Institute of Architecture and Civil Engineering of Volgograd State Technical University,
Russia

ANALYSIS OF BENDING PROBLEM OF PLATES WITH RIGID INCLUSIONS OR HOLES BY THE FEM IN THE FORM OF A CLASSICAL MIXED METHOD

The article presents an algorithm for the analysis of plate bending problem when a plate has rigid inclusions or rectangular holes. The algorithm is based on the finite element method (FEM) in the form of a classical mixed method developed by the authors as an alternative to the FEM in the form of displacement method. The efficiency of the algorithm is illustrated with the examples. It is shown that the classical mixed form of the FEM makes it possible to obtain a more accurate picture of the stress-strain state of the plate. In particular, in the corner zones of rigid inclusions and holes where the concentration of stresses (moments) occurs, the proposed algorithm allows to considerably reduce the order of the system of algebraic governing equations by considering it as a single finite element.

K e y w o r d s: bended plate, rigid inclusions, holes, Finite Element Method in the form of a classical mixed method.

REFERENCES

1. Golovanov A.I., Tyuleneva O.N., Shigabutdinov A.F. Metod konechnykh elementov v statike i dinamike tonkostennykh konstruktsiy [Finite element method in statics and dynamics of thin-walled structures]. Moscow, Fizmatlit, 2006. 391 p. (in Russian)
2. Gureeva N.A., Klochkov Yu.V., Nikolaev A.P. Uchet smeshcheniya konechnogo elementa kak zhestkogo tselogo v smeshannoy formulirovke MKE [The bias of the finite element as a rigid whole in a mixed formulation FEM]. Stroitel'naya mehanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy. Rossiyskiy universitet druzhby narodov [Structural mechanics of engineering constructions and buildings]. 2010. No 3. Pp. 47–53. (in Russian)
3. Zheleznov L.P., Kabanov V.V. Funktsii peremeshcheniy konechnykh elementov obolochki vrashcheniya kak tverdykh tel [Functions of the displacements of the finite elements of the shell rotation as solids]. Izv. AN SSSR. MTT [Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Solid mechanics]. 1990. No 1. Pp. 131–136. (in Russian)
4. Ignatyev A.V., Ignatyev V.A. Modified algorithm for the analysis of thin plates by the finite element method in the form of the classical mixed method. Procedia Engineering. 2016. T. 150. Pp. 1766–1770.

5. C a n t i n G. Smeshchenie krivolineynykh elementov kak zhestkogo tselogo [Deflection curved elements as the rigid whole]. Raketnaya tekhnika i kosmonavtika [Rocketry and astronautics]. 1970. No. 7. Pp. 84–88. (in Russian)
 6. L e n ' s h i n V.P. Raschet konstruktsiy s neregulyarnymi otverstiyami i vyrezami metodom neodnorodnykh konechnykh elementov [The analyses of structures with irregular holes and notches by the method of inhomogeneous finite elements]. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy [Structural mechanics and analyses of structures]. 1983. No. 2. Pp. 21–24. (in Russian)
 7. M a s l e n n i k o v A.M. Raschet stroitel'nykh konstruktsiy chislennymi metodami [The analyses of structures by numerical methods]. Leningrad, 1987. 224 p. (in Russian)
 8. P o k r o v s k i y A.A. O metode peremeshcheniy v MKE s otdeleniem smeshcheniy tverdogo tela [About the method of displacements in FEM with the separation of the displacements of a rigid body]. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy [Structural mechanics and the analyses of structures]. 2014. No. 4. Pp. 2–4. (in Russian)
 9. D l u g a c h M.I. Metod konechnykh elementov v primenenii k raschetu tsilindricheskikh obolochek s pryamougol'nymi otverstiyami [Finite element method as applied to the analyses of cylindrical shells with rectangular holes]. Prikl. mekhanika [Applied Mechanics]. 1973. T. 11, No. 11. Pp. 35–41. (in Russian)
-

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ



УДК 624.012.45

В.В. АДИЩЕВ, В.В. МАЛЬЦЕВ, М.Н. ДАНИЛОВ

ВЕРИФИКАЦИЯ ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОГИБОВ С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ*

С помощью численного моделирования в программном комплексе ANSYS (ПК ANSYS) выполнена апробация разработанного ранее численно-аналитического метода определения прогибов железобетонной балки с применением нелинейных диаграмм деформирования бетона. Метод основан на едином подходе к построению аппроксимаций диаграмм деформирования бетона и арматуры, аппроксимаций функции кривизны, функции распределения высоты сжатой зоны. Численное моделирование используется для определения напряженно-деформированного состояния изгибаемых армированных элементов из однородного ячеистого материала в состоянии предразрушения (перед образованием трещины). Армирование изгибаемых элементов выполнено полосами дюралюминия по различным схемам. Исходные данные по нагрузкам, соответствующим состоянию предразрушения, получены с помощью численно-аналитического метода. Анализ результатов показал, что данный метод позволяет адекватно описывать напряженно-деформированное состояние в армированных изгибаемых элементах до момента образования трещины.

Ключевые слова: численно-аналитический метод, физическая нелинейность, диаграмма деформирования, напряженно-деформированное состояние, процент армирования, однородный ячеистый материал, численное моделирование, ANSYS.

1. Введение. Работа посвящена апробации предложенного ранее численно-аналитического метода определения прогибов железобетонного элемента [1] с помощью численного моделирования в ПК ANSYS. При реализации данного метода использован единый подход к построению аппроксимаций диаграмм деформирования бетона и арматуры, а также аппроксимаций функции кривизны, высоты сжатой зоны и прогиба в зависимости от координаты по длине балки. Существует достаточное количество публикаций, посвященных исследованиям напряженно-деформированного состояния (НДС) изгибаемых железобетонных элементов в состоянии разрушения [2–4], в том числе с использованием численного моделирования [5–9], однако в данных исследованиях практически не уделено внимание стадии предразрушения железобетона. В настоящей работе численное моделирование в ПК ANSYS

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

используется для определения реального напряженно-деформированного состояния при изгибе элемента из однородного ячеистого материала, армированного полосами дюралюминия, в стадии предразрушения.

В статье [10] приводится обработка экспериментальных данных, полученных при испытании изгибаемых элементов из однородного ячеистого материала, армированных полосами дюралюминия. С помощью численно-аналитического метода определяется НДС для шести шарнирно-опертых по краям балок прямоугольного поперечного сечения с различными коэффициентами армирования μ_s и схемами армирования. Длина балок $l = 450$ мм, ширина $b = 100$ мм, высота h . Армирование балок выполнено из полосок дюралюминия с модулем упругости $E_s = 71\,000$ МПа по следующим схемам: образец 1 – неармированная балка ($h = 89$ мм); образец 2 – армированная балка 5 полосками дюралюминия шириной 1,5 мм и высотой 2,4 мм на нижней грани, $\mu_s = 0,002$ ($h = 90$ мм); образец 3 – армированная балка 3 полосками дюралюминия шириной 1,5 мм и высотой 2,9 мм на нижней грани, $\mu_s = 0,0015$ ($h = 90$ мм); образец 4 – армированная балка 3 полосками дюралюминия на нижней грани и 3 полосками на верхней грани шириной 1,5 мм и высотой 2,8 мм, $\mu_s = 0,0028$ ($h = 90$ мм); образец 5 – армированная балка 3 полосками дюралюминия шириной 1,0 мм и высотой 3,0 мм на нижней грани, $\mu_s = 0,001$ ($h = 90$ мм); образец 6 – армированная балка 7 полосками дюралюминия шириной 1,5 мм и высотой 3,2 мм на нижней грани, $\mu_s = 0,004$ ($h = 82$ мм). Защитный слой бетона отсутствует у всех образцов, поэтому полезная высота сечения балки $h_0 = h$.

Для балок 1–4 нагружение соответствует схеме трехточечного изгиба с сосредоточенной нагрузкой F , приложенной на равном удалении от шарнирных опор $l/2 = 225$ мм, для балок 5 и 6 – схема четырехточечного изгиба, при этом расстояние между двумя сосредоточенными силами F составляет $l/2 = 225$ мм, а минимальное расстояние между силой F – $l/4 = 112,5$ мм.

В работе [10] приводится диаграмма деформирования для однородного ячеистого материала аппроксимированная диаграммой Прандтля в зоне растяжения 0–3 и линейно-упругая зависимость в сжатой зоне 1–0 (рис. 1). Модуль упругости на сжатие $E_b = 2160$ МПа, на растяжение $E_{bt} = 2060$ МПа.

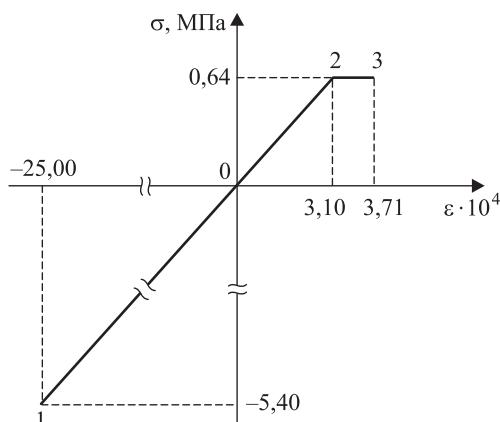


Рис. 1. Диаграмма деформирования однородного ячеистого материала

2. Реализация численного моделирования с применением диаграммы деформирования однородного ячеистого материала для различных схем армирования. С целью верификации предлагаемого численно-аналитического метода [1] проведено численное исследование напряженно-деформированного состояния шарнирно-опертых балок с различными схемами нагружения (рис. 2) в трехмерной постановке. При численном моделировании в ПК ANSYS для устранения концентраторов напряжений в местах

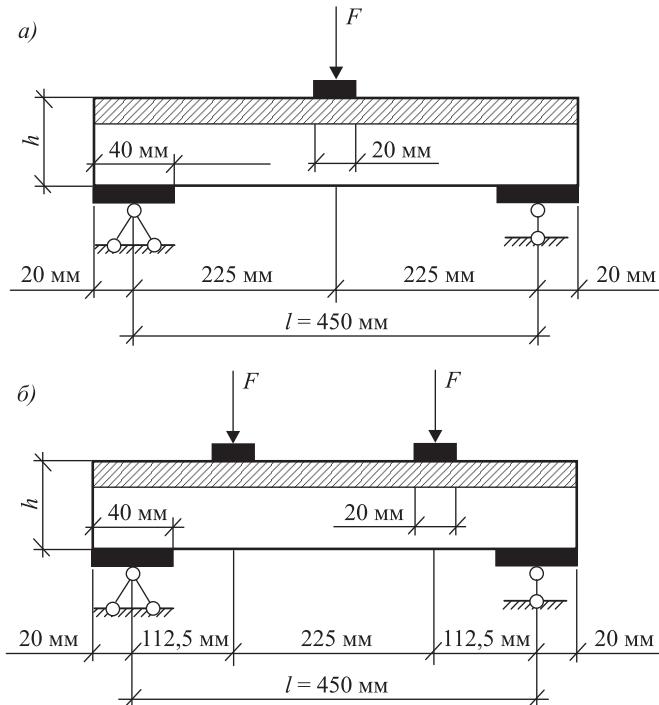


Рис. 2. Схема испытания образцов
а – трехточечный изгиб; б – четырехточечный изгиб

приложения нагрузки F , а также в районе опор, нагрузка F считается не сосредоточенной, а равномерно распределенной по площади шириной $b = 100$ мм и длиной 20 мм (см. черные прямоугольники в районе приложения силы на рис. 2). Верхний слой балки высотой 20 мм находится в упругой области (см. заштрихованный участок на рис. 2), нижняя часть балки деформируется в соответствии с диаграммой растяжения-скатия однородного ячеистого материала (см. рис. 1). Опорные реакции по аналогии с реакциями от нагрузки передаются по площади шириной $b = 100$ мм и длиной 40 мм (см. черные прямоугольники в районе опор на рис. 2).

Нагрузка F , соответствующая стадии предразрушения, определяется численно-аналитическим методом [1, 10], значения нагрузки для каждого образца приведены в табл. 1.

3. Результаты расчетов с использованием диаграммы деформирования однородного ячеистого материала при численном моделировании. В табл. 1 представлены результаты расчета разрушающего сечения (посредине пролета балки), полученные численно-аналитическим методом и с помощью численного моделирования в ПК ANSYS для шести балок-образцов с разными схемами нагружения и коэффициентами армирования. В данную таблицу входят следующие физические величины: ε_b – деформация крайнего сжатого волокна сечения; ε_{s1} , ε_{s2} – деформация растяжения и скатия в арматурном слое; Δ – прогиб в центре балки. Деформации крайнего растянутого волокна $\varepsilon_{bt} = \varepsilon_{s1}$, так как защитный слой бетона отсутствует у всех образцов. Аналогичная ситуация наблюдается в образце 2 с армированием в сжатой области, в данной балке $\varepsilon_b = \varepsilon_{s2}$.

Таблица 1. Сопоставление полученных результатов

Образец	Метод	Физические величины				
		$\varepsilon_b \cdot 10^4$	$\varepsilon_{s1} \cdot 10^4$	$\varepsilon_{s2} \cdot 10^4$	$F, \text{Н}$	$\Delta \cdot 10^2, \text{мм}$
1	Численно-аналитический	-3,62	3,77	-	895	13,7
	Численное моделирование в ПК ANSYS	-4,29	3,44	-	895	15,9
2	Численно-аналитический	-6,11	6,19	-	1635	21,3
	Численное моделирование в ПК ANSYS	-6,60	5,49	-	1635	25,6
3	Численно-аналитический	-4,86	4,76	-	1307	17,1
	Численное моделирование в ПК ANSYS	-5,25	4,35	-	1307	20,5
4	Численно-аналитический	-4,29	3,57	4,29	1306	14,8
	Численное моделирование в ПК ANSYS	-4,48	4,00	4,48	1306	18,5
5	Численно-аналитический	-4,64	4,70	-	1214	23,9
	Численное моделирование в ПК ANSYS	-4,85	4,91	-	1214	28,3
6	Численно-аналитический	-6,82	6,00	-	1689	35,9
	Численное моделирование в ПК ANSYS	-7,26	6,30	-	1689	43,0

Перепишем результаты табл. 1 в безразмерном виде (табл. 2), дополнив ее физическими величинами НДС. Образмеривание произведено по следующим формулам:

$\bar{F} = F / (bh_0\sigma_{02})$ – нагрузка в безразмерном виде в момент предразрушения, где $\sigma_{02} = 399 \text{ МПа}$; $\bar{\psi}(\varepsilon_b) = \psi(\varepsilon_b)/\sigma_{02}$, $\bar{\psi}(\varepsilon_b) = \psi(\varepsilon_b)/\sigma_{02}$ – нормальные напряжения по длине балки сжатого и растянутого волокна, где $\psi(\varepsilon)$ – функция, аппроксимирующая диаграмму деформирования бетона;

$\bar{\phi}(\varepsilon_{s1}) = \phi(\varepsilon_{s1})/\sigma_{02}$, $\bar{\phi}(\varepsilon_{s2}) = \phi(\varepsilon_{s2})/\sigma_{02}$ – нормальные напряжения растяжения и сжатия по длине балки в арматурном слое, где $\phi(\varepsilon_{s1}) = \sigma_{s1}$ и $\phi(\varepsilon_{s2}) = \sigma_{s2}$ – функции, аппроксимирующие диаграмму деформирования арматуры;

Таблица 2. Результаты расчета НДС разрушающего сечения в состоянии предразрушения для шести образцов

Образец	Метод	Безразмерные физические величины							
		μ_s	$\bar{F} \cdot 10^4$	$\frac{\varepsilon_b \cdot 10^4}{\bar{\psi}(\varepsilon_b) \cdot 10^3}$	$\frac{\varepsilon_{bt} \cdot 10^4}{\bar{\psi}(\varepsilon_{bt}) \cdot 10^3}$	$\frac{\varepsilon_{s1} \cdot 10^4}{\bar{\phi}(\varepsilon_{s1})}$	$\frac{\varepsilon_{s2} \cdot 10^4}{\bar{\phi}(\varepsilon_{s2})}$	ξ	$\bar{\Delta} \cdot 10^3$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Численно-аналитический	0	2,519	$\frac{-3,622}{-1,961}$	$\frac{3,770}{1,604}$	–	–	0,490	1,541
	Численное моделирование в ПК ANSYS			$\frac{-4,299}{-2,781}$	$\frac{3,443}{1,642}$	–	–	0,484	1,782
2	Численно-аналитический	0,002	4,553	$\frac{-6,116}{-3,311}$	$\frac{6,190}{1,604}$	$\frac{6,190}{0,110}$	–	0,497	2,363
	Численное моделирование в ПК ANSYS			$\frac{-6,604}{-4,248}$	$\frac{5,493}{1,689}$	$\frac{5,493}{0,097}$	–	0,473	2,847

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	Численно-аналитический	0,0015	3,641	$\frac{-4,856}{-2,629}$	$\frac{4,760}{1,604}$	$\frac{4,760}{0,085}$	—	0,505	1,904
	Численное моделирование в ПК ANSYS			$\frac{-5,249}{-3,381}$	$\frac{4,351}{1,612}$	$\frac{4,351}{0,077}$	—	0,477	2,275
4	Численно-аналитический	0,0028	3,638	$\frac{-4,291}{-2,323}$	$\frac{3,570}{1,604}$	$\frac{3,570}{0,065}$	$\frac{-4,291}{-0,076}$	0,539	1,643
	Численное моделирование в ПК ANSYS			$\frac{-4,482}{-2,431}$	$\frac{4,003}{1,673}$	$\frac{4,003}{0,071}$	$\frac{-4,482}{-0,078}$	0,451	2,054
5	Численно-аналитический	0,001	3,381	$\frac{-4,644}{-2,514}$	$\frac{4,700}{1,604}$	$\frac{4,700}{0,084}$	—	0,497	2,652
	Численное моделирование в ПК ANSYS			$\frac{-4,848}{-2,505}$	$\frac{4,910}{1,681}$	$\frac{4,910}{0,087}$	—	0,501	3,142
6	Численно-аналитический	0,004	5,164	$\frac{-6,821}{-3,692}$	$\frac{6,000}{1,604}$	$\frac{6,000}{0,107}$	—	0,532	4,385
	Численное моделирование в ПК ANSYS			$\frac{-7,261}{-3,744}$	$\frac{6,309}{1,679}$	$\frac{6,309}{0,112}$	—	0,543	5,246

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

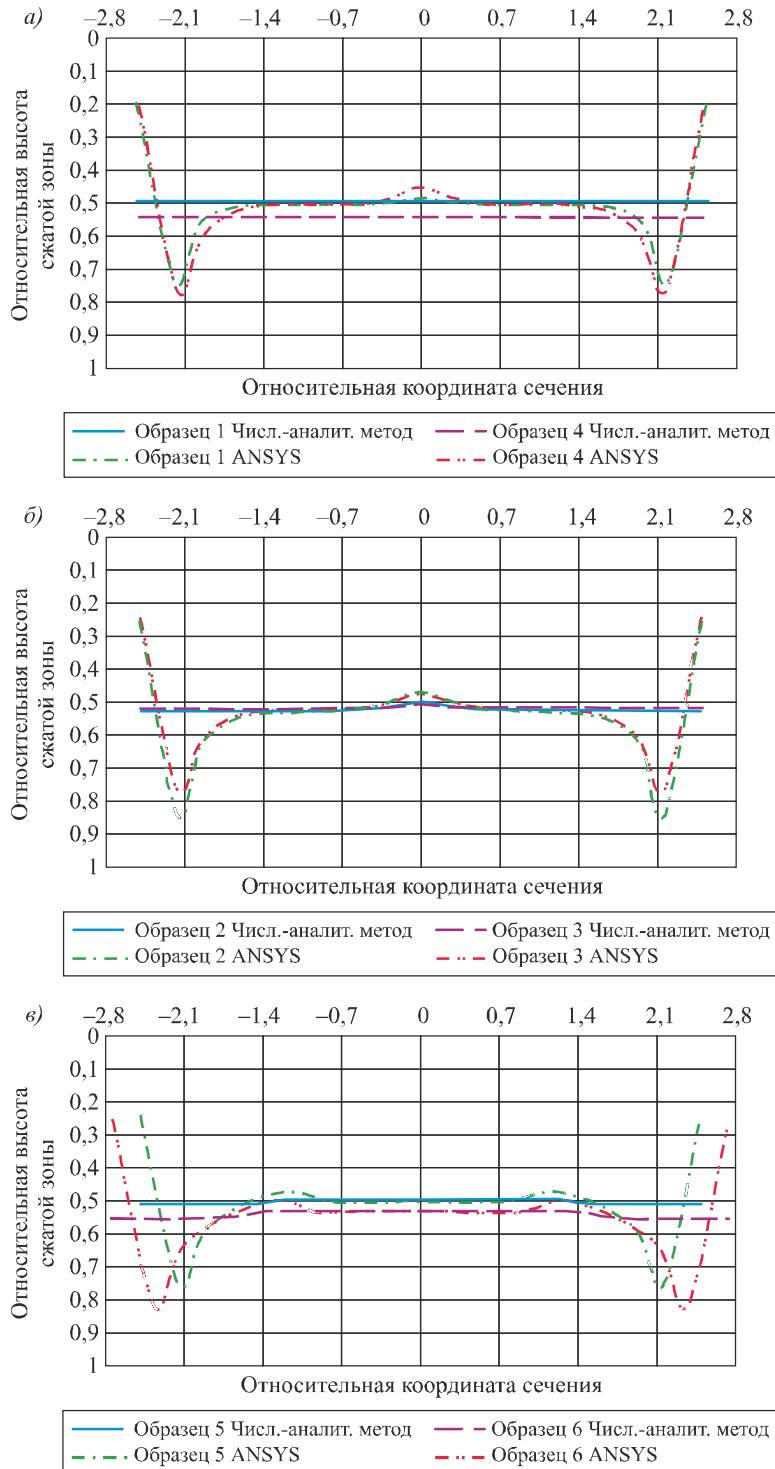
$\Delta = \Delta / h_0$ – относительный прогиб в центре балки.

По результатам расчетов (см. табл. 2) высота сжатой зоны совпадает с погрешностью $\sim 5\%$ практически для всех образцов. Исключением является образец 4 с армированием в сжатой и растянутой области: в нем высота сжатой зоны, найденная с помощью численного моделирования, на $\sim 20\%$ ниже, чем определенная с помощью численно-аналитического метода (рис. 3, а).

Вследствие физической нелинейности поведения бетона высота сжатой зоны по длине балки не является величиной постоянной, кроме зоны чистого изгиба в образцах 5 и 6 (рис. 3, в).

Сжатая зона не изменяется на приопорных участках, на которых выполняются соотношения закона Гука в численно-аналитическом методе. В действительности в районе опор реализуется сложное напряженное состояние, следствием которого является резкое увеличение сжатой зоны на участке длиной 40 мм (от торца балки до конца опорного участка, см. рис. 2). Следует отметить, что на рис. 3, в «пики», соответствующие максимальной высоте сжатой зоны в различных образцах, не накладываются друг на друга вследствие того, что обезразмеривание геометрических величин выполняется делением этих величин на высоту образцов, которые отличаются для разных образцов (у образца 5 – $h = 90$ мм, у образца 6 – $h = 82$ мм).

Для образцов, испытывающихся по схеме трехточечного изгиба, ближе к центру балки высота сжатой зоны становится постоянной (см. рис. 3, а, б) кроме участка длиной 20 мм, на который передается нагрузка, над ними



*Рис. 3. Распределение относительных высот сжатой зоны
а – образцы 1 и 4; б – образцы 2 и 3; в – образцы 5 и 6*

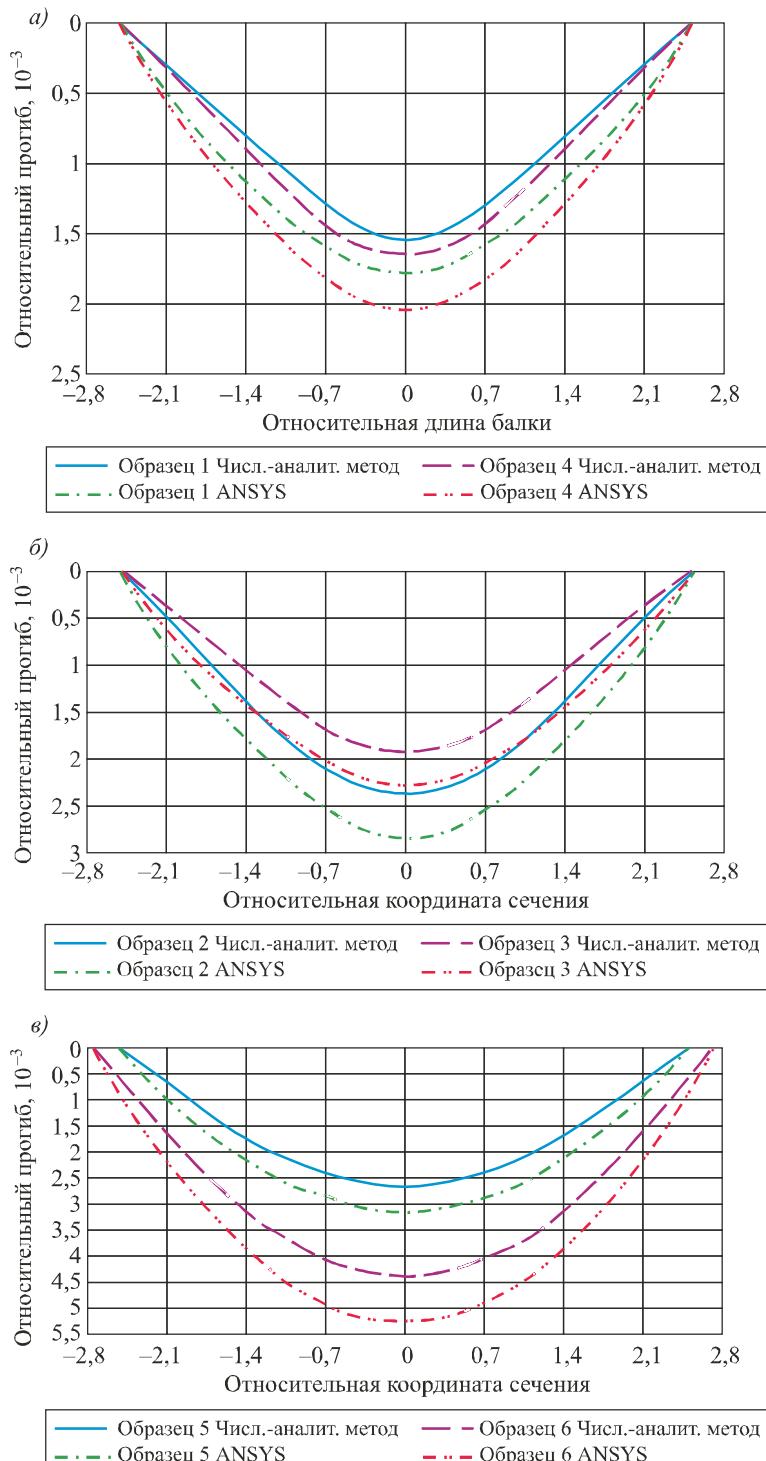


Рис. 4. Распределение относительных прогибов
а – образцы 1 и 4; *б* – образцы 2 и 3; *в* – образцы 5 и 6

величина сжатой зоны уменьшается. Таким образом, наблюдается хорошая согласованность изменения высоты сжатой зоны, определенной численно-аналитическим методом, с результатами численного моделирования, расхождения зафиксированы только в районе опорных участков.

Прогибы, определенные с помощью численного моделирования в ПК ANSYS, в разрушающем сечении превышают на 15–17 % прогибы, найденные с помощью численно-аналитического метода. При этом с помощью численно-аналитического метода прогиб определялся для нейтрального слоя, а при численном моделировании для нижней (растянутой) грани балки. При моделировании в ПК ANSYS происходит резкое увеличение прогиба в районе опор (рис. 4), затем за пределами опор эпюра принимает вид параболы.

Прогибы для образцов 5 и 6 не выходят из одной точки в районе опор (рис. 4, в) из-за обезразмеривания длины балки, выполненного делением на высоту образца (образец 5 – $h = 90$ мм, образец 6 – $h = 82$ мм).

4. Заключение. Сравнение экспериментальных данных, полученных в результате численного моделирования в ПК ANSYS, с результатами расчетов численно-аналитическим методом для образцов с различными схемами армирования и нагружения позволяют сделать следующие выводы.

Вычисления показали, что высота сжатой зоны существенно изменяется вдоль балки. Постоянное значение высота сжатой зоны имеет только в зоне чистого изгиба (образцы 5 и 6). Определенная численно-аналитическим методом высота сжатой зоны хорошо согласуется с результатами численного моделирования. Расхождения наблюдаются только в районе опорных участков, на которых реализуется сложное напряженное состояние, не учитываемое в численно-аналитическом методе.

Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными показало, что предложенный авторами численно-аналитический метод позволяет адекватно моделировать напряженно-деформированное состояние в железобетонных балках до момента образования трещины и в предельном состоянии предразрушения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адищев В.В., Мальцев В.В. Численно-аналитический метод определения прогибов железобетонной балки с применением реальной нелинейной диаграммы деформирования бетона // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 9. С. 5–17.
2. Котов А.А. Напряженно-деформированное состояние железобетонной балки в сечении с трещиной при чистом изгибе // Исследования по механике строительных конструкций и материалов. Л., 1982. С. 118–123.
3. Лемыш Л.Н. Расчет железобетонных конструкций по деформациям и несущей способности с учетом полных диаграмм деформирования бетона и арматуры // Железобетонные конструкции промышленных зданий. М.: ЦНИИПромздания, 1984. С. 74–89.
4. Леншин В.П. К вопросу разработки и использования моделей деформирования железобетонных конструкций с трещинами // Строительная механика и расчет сооружений. 1980. № 6. С. 34–36.
5. Клейн В.Г., Колтаков П.В. Моделирование процесса образования дефектов в железобетонных балках с использованием МКЭ // Вестн. Моск. автомобильно-дорожного гос. техн. ун-та (МАДИ). 2009. № 2. С. 86–89.

6. Лукин А.В., Модестов В.С. Конечно-элементное моделирование и анализ напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. Физ.-мат. науки. 2014. № 3. С. 35–46.
7. Замалиев Ф.С., Гурьянов И.А., Шаймурданов Р.И., Хайрутдинов Ш.Н. Численные и натурные эксперименты в исследованиях сталежелезобетонных конструкций // Изв. КГАСУ. 2012. № 1. С. 46–52.
8. Yang X., Chen H., Han Z. Regularity on stress of steel bars in reinforced concrete beam after cracking // Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition). 2017. No. 36. P. 718–723.
9. Hosseini M., Amiri A.M., Beiranvand P. Numerical analysis of reinforced concrete beams containing bending and shear opening and strengthened with FRP sheet // Engineering Solid Mechanics. 2016. No. 4. P. 145–152.
10. Адищев В.В., Мальцев В.В. Определение напряженно-деформированного состояния в армированных балках из однородного ячеистого материала численно-аналитическим методом // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 4. С. 5–16.

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

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Мальцев Виктор Васильевич, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Данилов Максим Николаевич, ст. препод.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 22.08.17

Adishchev Vladimir Vasilievich, DSc, Professor

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

Maltsev Viktor Vasilievich, Post-graduate Student

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

Danilov Maksim Nikolaevich, Senior Lecturer

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

VERIFICATION OF NUMERICAL-ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINING DEFLECTION BY NUMERICAL SIMULATION

In the ANSYS software package, numerical simulation was used to test the previously developed numerical-analytical method for determining the deflections of a reinforced concrete beam using nonlinear diagrams of concrete deformation. The method is based on a unified approach to the construction of approximations of the deformation diagrams of concrete and reinforcement, approximations of the curvature function, the distribution function of the height of the compressed zone. Numerical simulation is used to determine the stress-strain state of bent reinforced elements from a homogeneous cellular material in the state of prefracture (before crack formation). The reinforcement of the bent elements is made by strips of duralumin according to various schemes. Initial data on the loads corresponding to the state of prefracture were obtained using a numerical-analytical method. An analysis of the obtained results showed that the application of the numerically analytical method adequately describes the stress-strain state in the reinforced bent elements until the moment of crack formation.

К e y w o r d s: numerically-analytical method, the physical nonlinearity, charts of deformation, stress-strain state, percentage of reinforcement, homogeneous cellular material, numerical simulation, ANSYS.

REFERENCES

1. A d i s h c h e v V.V., M a l t s e v V.V. Chislenno-analiticheskiy metod opredeleniya progibov zhelezobetonnoy balki s primeneniem real'noy nelineynoy diagrammy deformirovaniya betona [The numerical-analytical method for determining the deflection of reinforced concrete beams with use real nonlinear stress-strain charts of concrete]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 9. Pp. 5–17. (in Russian)
2. K o t o v A.A. Napryazhенно-deformirovannoe sostoyanie zhelezobetonnoy balki v sechenii s treshchinoy pri chistom izgibe [Stress-strain state of a reinforced concrete beam in a section with a crack in pure bending]. Issledovaniya po mekhanike stroitel'nykh konstruktsiy i materialov [Studies in the mechanics of building structures and materials]. Leningrad, 1982. Pp. 118–123. (in Russian)
3. L e m y s h L.N. Raschet zhelezobetonnykh konstruktsiy po deformatsiyam i nesushchey sposobnosti s uchetom polnykh diagramm deformirovaniya betona i armatury [Calculation of reinforced concrete structures on the deformation and load-bearing capacity, taking into account the full diagrams of concrete and reinforcement strain]. Zhelezobetonnye konstruktsii promyshlennyykh zdaniy [Ferroconcrete constructions of industrial buildings]. Moscow, 1984. Pp. 74–89. (in Russian)
4. L e n s h i n V.P. K voprosu razrabotki i ispol'zovaniya modeley deformirovaniya zhelezobetonnykh konstruktsiy s treshchinami [On the issue of development and usage patterns of deformation of reinforced concrete structures with cracks]. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy [Construction mechanics and design of structures]. 1980. No. 6. Pp. 34–36. (in Russian)
5. K l e i n V.G., K o l t a k o v P.V. Modelirovanie protessa obrazovaniya defektov v zhelezobetonnykh balkakh s ispol'zovaniem MKE [Modeling of defects origin process in reinforced concrete beams with using of FEA]. Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI) [News of the Moscow State Automobile and Road Technical University (MADI)]. 2009. No. 2. Pp. 86–89. (in Russian)
6. L u k i n A.V., M o d e s t o v V.S. Konechno-elementnoe modelirovanie i analiz napryazhенно-deformirovannogo sostoyaniya zhelezobetonnykh konstruktsiy [Finite element modeling and analysis of the stress-strain state of reinforced concrete structures]. Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Fiziko-matematicheskie nauki [St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology]. 2014. No. 3. Pp. 35–46. (in Russian)
7. Z a m a l i e v F.S., G u r i a n o v I.A., S h a y m a r d a n o v R.I., K h a i r u t d i n o v Sh.N. Chislennye i naturnye eksperimenty v issledovaniyah stalezhelezobetonnykh konstruktsiy [Numerical and natural experiments in probes of composite steel and concrete structures]. Izvestiya KGASU [News of the Kazan State University of Architecture and Engineering]. 2012. No. 1. Pp. 46–52. (in Russian)
8. Y a n g X., C h e n H., H a n Z. Regularity on stress of steel bars in reinforced concrete beam after cracking. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition). 2017. No. 36(7). Pp. 718–723.
9. H o s s e i n i M., A m i r i A.M., B e i r a n v a n d P. Numerical analysis of reinforced concrete beams containing bending and shear opening and strengthened with FRP sheet. Engineering Solid Mechanics. 2016. No. 4. Pp. 145–152.
10. A d i s h c h e v V.V., M a l t s e v V.V. Opredelenie napryazhенно-deformirovannogo sostoyaniya v armirovannykh balkakh iz odnorodnogo yacheistogo materiala chislenno-analiticheskim metodom [Definition of stress-deformed state in reinforced beams of homogeneous cellular material by the numerical-analytical method]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 4. Pp. 5–16. (in Russian)

УДК 624.042.8 : 625.73.1

А.В. СМИРНОВ, А.Ю. БАЖЕНОВА, А.С. ДЕМИН

О КРИТЕРИЯХ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПРОЕЗЖЕЙ ЧАСТИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Рассмотрены следствия расчета дорожных слоистых конструкций на воздействие подвижной колесной нагрузки. Предложены три критерия динамической прочности для расчета толщины конструкций. Отмечены особенности динамических процессов в них и их отличия от статических. Они проявляются в новых для дорог критериях прочности – динамических прогибов, напряжений растяжения при изгибе и сдвиге. Действующие в РФ статические расчеты прочности автомагистралей и дорог недостаточны для гарантии их долговечности.

Ключевые слова: динамический прогиб, общий динамический модуль упругости, частота колебаний.

В России создана сеть национальных дорог протяженностью более 1 млн км. Уложено в покрытиях проезжей части около 3 млрд т асфальтовых бетонов, 6 млрд м³ щебня и 6 млрд м³ песка. Стоимость строительства этой сети дорог составила свыше 20 триллионов руб., что соизмеримо с бюджетом РФ. Дорожная сеть России – это национальное богатство, и его следует увеличивать и берегать. Однако, построенная сеть дорог почти на трети протяженности нуждается в ремонте и реконструкции. Связано это со снижением срока службы и относительно быстрой потерей прочности, происходящих из-за ошибок в проектах строительства, выполненных по действующим нормам расчета дорог на прочность (ОДН 218.046–01. Проектирование нежестких дорожных одежд. Методические рекомендации по проектированию жестких дорожных одежд. Взамен ВСН 197–91).

Суть ошибок состоит в том, что расчет производится на воздействие стоящих автомобильных нагрузок. Между тем движущиеся транспортные средства вызывают совершенно иное динамическое напряженно-деформированное состояние в каждом из слоев дорожной конструкции с образованием на покрытии общего динамического колебательного волнового процесса [1]. Для его учета целесообразно в нормативы на проектирование ввести новые критерии прочности – динамические:

$$K_{\text{пр}}^{\text{дин}} = \frac{U}{|U|}, \quad K_{\text{пр}}^{\sigma_r} = \frac{\sigma^r}{|R|}, \quad K_{\text{пр}}^{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{сж}}}{|R|_{\text{сж}}}.$$

Здесь приведенные критерии означают коэффициенты прочности по динамическим деформациям U , динамическим растягивающим напряжениям σ^r и сжимающим слой конструкции напряжениям $\sigma_{\text{сж}}$. Знаменатели критериев – это предельно допустимые характеристики материалов слоев дорожных конструкций, не допускающие разрыв сплошности монолитных слоев и сдвиг в дискретных материалах и грунтах до исчерпания заданного

срока службы. Если все коэффициенты во всех слоях конструкции равны единице, то слоистая дорожная конструкция динамически устойчива [2–5].

Вычисление указанных критериев произведено по [1] и имеет следующие особенности: максимальный прогиб поверхности дорожной слоистой конструкции есть сумма прогибов всех ее слоев

$$U^{\text{дин}} = \sum_1^m U_j, \quad 1 \leq j \leq m.$$

От центра нагружения подвижной нагрузкой он распространяется по поверхности и в каждом слое знакопеременно [6–11]. Дифференциальный

Расчетные параметры критериев динамической прочности проезжей части дорог

Показатель	Тип покрытия						
	асфальтобетон		цементобетон				
Толщина покрытия, см	18 108	14 94	30 150	35 135	40 150	18 68	35 145
Толщина конструкции H , см							
Динамический общий модуль $E_{\text{дин}}$, МПа	450 49	495 41	1643 41	2190 56	2640 41	640 41	1155 56
Модуль упругости грунта $E_{\text{грун}}$, МПа							
Категория дороги	I	I	I	I	I	III	ВПП**
Срок службы, годы	20	20	40	40	40	20	–
Напряжения сжатия в грунте $\sigma_{\text{сж}}$, МПа	0,032	0,029	0,016	0,02	0,016	0,25	0,0361
Напряжения растяжения σ_r , в покрытии, МПа основания	0,47	0,94	0,73 0,12	0,15 0,14	0,73	1,5 0,04	0,47
Динамический прогиб $U_{\text{дин}}$ от нагрузки АК100, мм*	0,198	0,29	0,069	— 0,07	0,0681	0,25	3,59

Критерии прочности:

по деформациям $K_{\text{пп}}^U = \frac{U_{\text{дин}}}{ U_{\text{дин}} } \leq 1$	0,99	0,92	0,973	1,0	0,973	0,62	2,17
растягивающим напряжениям $K_{\text{пп}}^{\sigma_r} = \frac{\sigma_r}{ R } \leq 1$	0,47	0,98	0,41– 0,5	0,44– 0,14	0,94	1,65– 0,04	0,91
допускаемым давлениям $K_{\text{пп}}^{\sigma} = \frac{\sigma_{\text{сж}}}{ R ^{\text{fp}}} \leq 1$	0,6 0,91	0,21 0,91	0,13	0,40	0,5– 0,41	–	0,68
Частота колебаний, с^{-1} : покрытия грунтового основания	–	8,9 –	10,7 2,7	7,1 –	10,7 2,67	–	66 –
Отставание деформаций от напряжений, см: в покрытии	0,22	0,11	0,17	0,20	0,24	0,48	0,74
основании	3,37	3,37	5,6	4,05	5,06	18,8	–
грунтовом основании	29,19	44,4	21,2	20,37	21,2	126,5	98,8

* Скорость нагрузки АК100 – 80 км/ч.

** Скорость нагрузки $P = 546,8$ кН (Боинг 747) – 260 км/ч.

анализ получаемой кривой колебаний дает значение радиуса ее кривизны R_j , а растягивающее напряжение при изгибе получают как

$$\sigma_j^r = \frac{E_j h_j}{2R_j}.$$

В СибАДИ произведен расчет дорожных конструкций по [1] с вычислением параметров, входящих в критерии динамической прочности (таблица). Расчету подвергнуты конструкции дорог I, III категорий и взлетно-посадочная полоса (ВПП) аэродрома нежесткого и жесткого типов.

Из полученных значений (см. таблицу и рис. 1) следует, что в дорожных конструкциях при воздействии подвижных вертикальных нагрузок убывают динамические прогибы, растягивающие напряжения и сжимающие напряжения с увеличением общего динамического модуля упругости $E_{дин}$.

Этому свойству подчиняются одежду нежесткого и жесткого типа. Установлено, что частота вертикальных колебаний при скорости движения нагрузки 80 км/ч в покрытиях составляет 7–10 кол./с, динамическая нагрузка убывает с глубиной и в грунтовых основаниях не превышает 2,7 кол./с (рис. 2, б). Расчеты показывают отставание во времени и пространстве упругих деформаций в слоях конструкций от центра приложения подвижной нагрузки (рис. 2, а) в сторону, обратную вектору скорости V [12]. При скорости нагрузки в 260 км/ч (ВПП аэродромов) частота колебаний уже 66 кол./с.

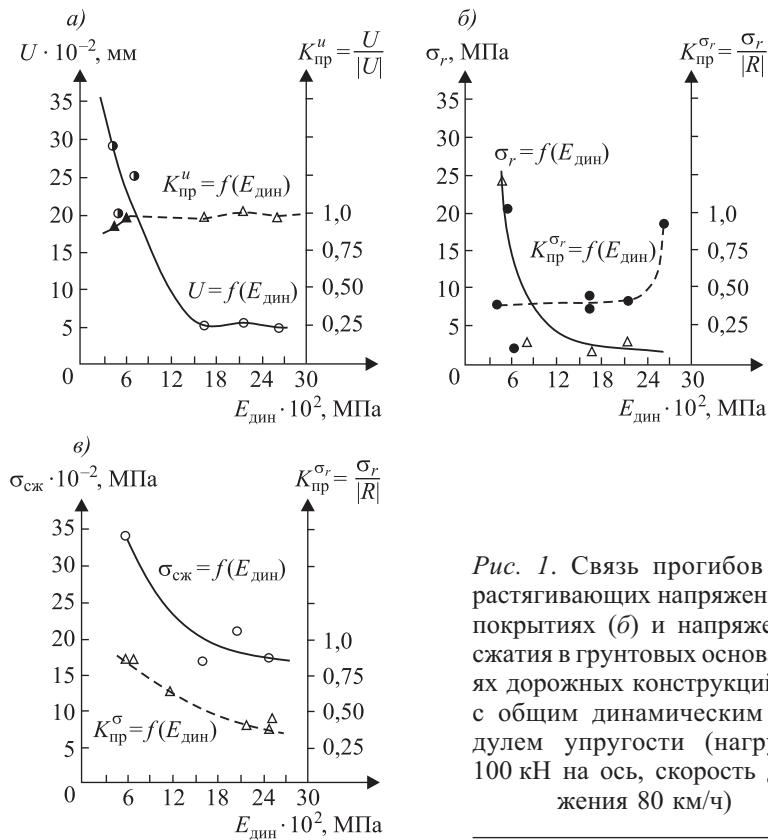


Рис. 1. Связь прогибов (а), растягивающих напряжений в покрытиях (б) и напряжений сжатия в грунтовых основаниях дорожных конструкций (в) с общим динамическим модулем упругости (нагрузка 100 кН на ось, скорость движения 80 км/ч)

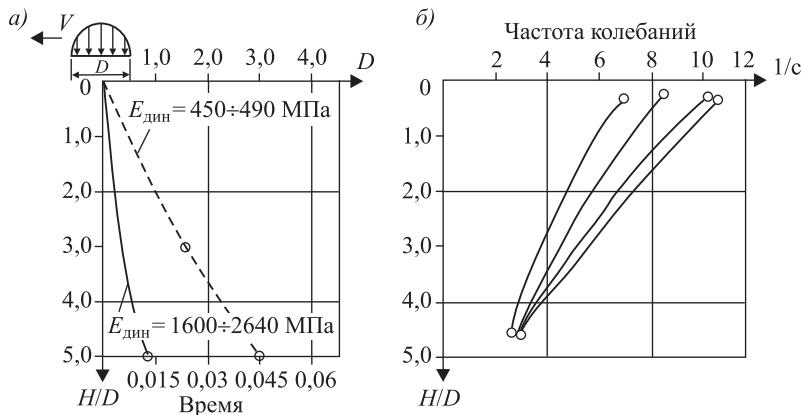


Рис. 2. Отставание вертикальных деформаций (прогибов) (а) и убывание частоты колебаний (б) по толщине дорожных конструкций при $V = 80$ км/ч, $D = 34$ см

Коэффициент прочности по динамическому прогибу $K_{\text{пр}}$ для всех рассчитанных конструкций почти равен 1 (см. рис. 1, а). Это означает, что он является первостепенным и пригодным для назначения общей толщины дорожной конструкции. Остальные критерии прочности $K_{\text{пр}}^{\sigma_r}$ и $K_{\text{пр}}^{\sigma_{\text{сж}}}$ существенно меньше единицы (рис. 1, б, в). Следовательно, предельные состояния в слоях на растяжение при изгибе и сдвиге в конструкциях не наступают и они играют второстепенную роль.

Выводы. 1. Главной характеристикой динамических процессов в слоистых дорожных конструкциях является их общий динамический модуль упругости.

2. Динамическая прочность слоистой дорожной конструкции характеризуется тремя критериями, не допускающими чрезмерных вертикальных деформаций конструкции, разрыва сплошности монолитных слоев от напряжений растяжения при изгибе и напряжений сжатия в дискретных и грунтовых слоях, зависящих от сдвигостойчивости. При критериях, равных или менее 1 (≤ 1), конструкция считается динамически устойчивой.

3. Особенностью динамических процессов в слоистых дорожных конструкциях в сравнении со статическими является выраженная асимметрия деформаций и напряжений по глубине конструкций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Смирнов А.В., Баженова А.Ю. Расчет дорог на прочность. Омск: СибАДИ, 2017. 63 с.
- Приварников А.К., Радовский Б.С. Действие подвижной нагрузки на вязкоупругое многослойное основание // Прикладная механика. 1981. Т. 17, № 6. С. 45–52.
- Углова Е.В., Тиратуриян А.Н. Оценка прочности нежестких дорожных одежд // Дорожная держава. 2014. № 57. Режим доступа: <http://www.dorvest.ru/dd/archiv/item/57-2014>.
- Справочник по динамике сооружений / Под ред. Б.Г. Коренева, И.М. Рабиновича. М.: Стройиздат, 1972. 511 с.

5. Крицук З.А. Колебания плиты, лежащей на упругом с последействием основании, с учетом массы подвижной нагрузки // Теория оболочек и пластин: Тр. IV Всесоюз. конф. по теории оболочек и пластин. Ереван, 24–31 окт. 1962 г. / Акад. наук Арм. ССР, Ин-т математики и механики [Отв. ред. С.М. Дургарьян]. Ереван, 1964. С. 180–187.
6. Sлаchta M. La dynamique des chaussées en béton de bitume // Bull. lieis, Lab. ponts et chaussées (ex «Bull. liaus. Lab, rout, ponts et chausses»). 1971. No. 50.
7. Lust H. (dr.), Hammerschmidt K. (ing.) Ergebnisse von dynamischen Messungen an vorhandenen Straßenbefestigungen // Die Straße. 1968. No. 10. S. 505–510.
8. Смирнов А.В. Динамика дорожных одежд автомобильных дорог. Омск: ЗапСибиздат, 1975. 182 с.
9. Кильчевский Н.А., Ильчишина Д.И. О поверхностных волнах, возникающих при соударении упругих тел // Прикладная механика. 1969. Т. 5, вып. 7. С. 3–7.
10. Колмогоров Г.Л., Кычкин В.И., Есиенко И.А. Интеллектуализация вибродиагностической лаборатории автомобильных дорог // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Охрана окружающей среды, транспорт, безопасность жизнедеятельности. 2013. № 1. С. 69–77.
11. Андреева Е.В., Смирнов А.В. Современные методы проектирования дорожных конструкций автомагистралей на воздействие транспортных потоков: Моногр. Омск: СибАДИ, 2014. 136 с.
12. Найвельт В.В. Действие подвижной нагрузки на бесконечную плиту, лежащую на упругом основании // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1967. № 5. С. 161–169.

Смирнов Александр Владимирович, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск

Баженова Алена Юрьевна, инж.

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск

Демин Александр Сергеевич, асп.

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
г. Омск

Получено после доработки 22.08.17

Smirnov Aleksandr Vladimirovich, DSc, Professor

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Bazhenova Alyona Yurjevna, Engineer

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

Demin Alexandr Sergeevich, Post-graduate Student

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI), Omsk, Russia

ABOUT THE CRITERIA FOR THE DYNAMIC STRENGTH OF THE ROADWAY OF HIGHWAY

The consequences of the calculation of road layered structures on the impact of a mobile wheel load are considered. Three criteria of dynamic strength for calculating the thickness of structures are proposed. The features of dynamic processes in them and their differences from static ones are noted. They are manifested in new for the road strength criteria – dynamic deflections, tensile stresses in bending and shear. The current static calculations of the strength of highways and roads in Russia are not sufficient to guarantee their durability.

Key words: dynamic deflection, general dynamic modulus of elasticity, oscillation frequency.

REFERENCES

1. Smirnov A.V., Bazhenova A.Yu. Raschet dorog na prochnost' [Road strength calculation]. Omsk, SibADI, 2017. 63 p. (in Russian)
2. Privarnikov A.K., Radovskiy B.S. Deystvie podvizhnay nagruzki na vyazko-uprugoe mnogosloynoe osnovanie [Live load affects on the viscoelastic multilayer foundation]. Prikladnaya mekhanika [Applied Mechanics]. 1981. No. 6. Pp. 45–52. (in Russian)
3. Uglanova E.V., Tigratryan A.N. Otsenka prochnosti nezhestkikh dorozhnykh odeszh [Evaluation of flexible road pavements strength]. Dorozhnaya derzhava. 2014. No. 57. Available at: <http://www.dorvest.ru/dd/archiv/item/57-2014>. (in Russian)
4. Spravochnik po dinamike sooruzheniy [Handbook of structure dynamics]. Moscow, Stroyizdat, 1972. 511 p. (in Russian)
5. Kristsuk Z.A. Kolebaniya plity, lezhashchey na uprugom s posledeystviem osnovanii, s uchetom massy podvizhnay nagruzki [Vibration of the slab being laid on the elastic-hereditary foundation, with the moving load weight taken into account]. Trudy IV Vsesoyuznoy konferentsii po teorii obolochek i plastin. Erevan, 1964. Pp. 180–187. (in Russian)
6. Slachta M. La dynamique des chausses en beton de oiment. Bull, lieis, Lab. ponts et chausées (ex «Bull. liaus. Lab, rout, ponts et chausées»), 1971. No. 50.
7. Dr. H. Lust, Ing. K. Hammerschmidt. Ergebnisse von dynamischen Messungen an vorhandenen Straßenbefestigungen. Die Straße. 1968. No. 10. S. 505–510.
8. Smirnov A.V. Dinamika dorozhnykh odeszh avtomobil'nykh dorog [Dynamics of automobile road pavements]. Omsk, 1975. 182 p. (in Russian)
9. Kilevchik N.A., Il'chishina D.I. O poverkhnostnykh volnakh, voznikayushchikh pri soudarenii uprugikh tel [On the surface waves initiated due to the collision of elastic bodies]. Prikladnaya mekhanika [Applied Mechanics]. 1969. T. 5, No. 7. Pp. 3–7. (in Russian)
10. Kolmogorov G.L., Kychkin V.I., Esipenko I.A. Intellektualizatsiya vibrodiagnosticheskoy laboratorii avtomobil'nykh dorog [Intellectualization of the vibrodiagnostic road laboratory]. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Okhrana okrughayushchey sredy, transport, bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti [Bulletin PNIPU. Protection of the environment, transport, life safety]. 2013. No. 1. Pp. 69–77. (in Russian)
11. Andreeva E.V., Smirnov A.V. Sovremennye metody proektirovaniya dorozhnykh konstruktsiy avtomagistraley na vozdeystvie transportnykh potokov [Modern methods for designing highway structures under the impact of traffic flows]. Omsk, SibADI, 2014. 136 p. (in Russian)
12. Nayvel't V.V. Deystvie podvizhnay nagruzki na beskonechnuyu plitu, lezhashchuyu na uprugom osnovanii [Moving load effect on the infinite plate on elastic foundation]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Highes Educational Institutions. Construction and Architecture]. 1967. No. 5. Pp. 161–169. (in Russian)

УДК 624.15

А.Л. ЛАНИС, В.С. ВОРОБЬЕВ, Д.А. РАЗУВАЕВ, П.О. ЛОМОВ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ НАБИВНОЙ СВАИ ПО ГРУНТУ, ВЫПОЛНЕННОЙ В РАСКАТАННОЙ СКВАЖИНЕ

Повышение эффективности проектирования устройства набивных свай методом раскатки скважин основано на разработке уточненной методики определения несущей способности таких свай. В статье проанализирована отечественная и зарубежная нормативная и научная литература по этому вопросу. На основе практического опыта и экспериментальных натурных исследований на реальных строительных площадках предложен способ расчета, в котором учитываются неравномерность изменения диаметра сваи по глубине, влияние эффекта от уплотнения грунта в околосвайном пространстве, а также фактические прочностные характеристики уплотненного грунта в околосвайном пространстве.

Ключевые слова: набивная свая, раскатка скважины, несущая способность сваи, уплотненный грунт, расчет несущей способности сваи.

В практике промышленного, гражданского и транспортного строительства известен метод устройства набивных свай в предварительно раскатанных скважинах [1, 2]. Технология раскатки скважин позволяет увеличить прочностные и деформационные характеристики грунта вокруг набивной сваи за счет глубинного уплотнения. Данный метод получил широкое распространение при усилении грунтов основания за счет высокой технической и экономической эффективности и отсутствия динамического воздействия на рядом расположенные здания и сооружения* [3].

Несмотря на существенные преимущества, данный метод устройства набивных свай не обладает достаточной расчетной и нормативной базой для проектирования. В частности, не решен вопрос расчетного определения несущей способности таких свай.

Требования отечественных и европейских нормативных документов для расчета несущей способности свай обладают определенными неточностями для рассматриваемых набивных свай в раскатанных скважинах. Согласно требованиям СП 24.13330.2010 «Свайные фундаменты» несущая способность сваи по грунту F_d , кН, на вертикальную сжимающую нагрузку определяется как сумма расчетных сопротивлений грунтов под острием сваи и по ее боковой поверхности

$$F_d = \gamma_c (\gamma_{cR} RA + \gamma_{cf} u \sum f_i h_i). \quad (1)$$

Расчет набивных свай в раскатанных скважинах возможен по формуле (1) [4, 5], однако она не учитывает некоторые особенности изготовления и работы таких свай. Учет технологии изготовления сваи в формуле (1) выполняется путем изменения эмпирических коэффициентов γ_{cR} и γ_{cf} , при этом

* Несущая способность таких свай определяется преимущественно опытным путем в рамках предпроектных работ.

в формуле не учитывается влияние уплотненного в результате раскатки грунта в околосвайном пространстве. Данная формула включает расчетное сопротивление под нижним концом сваи R и расчетное сопротивление по боковой поверхности f_i , которые принимаются для глинистого грунта по таблицам в зависимости от показателя консистенции. Исследования, выполненные Ф.К. Лапшиным [6], показывают, что показатель консистенции не характеризует с достаточной точностью прочностные и деформационные характеристики грунта. Таким образом, формула (1) несет в себе существенные погрешности в определении несущей способности набивной сваи в раскатанной скважине. А ее применение может занижать фактическую несущую способность сваи, поскольку не используются значения прочностных характеристик грунта c и ϕ , увеличивающиеся в процессе раскатки скважин.

Еврокод 7 «Геотехническое проектирование» содержит расчетный способ определения осевой несущей способности сваи по результатам лабораторных испытаний грунта. Расчет заключается в определении сопротивления на боковой поверхности ствола сваи R_s и сопротивления концевой опоры сваи R_b

$$F_d = R_s + R_b = \sum u_i q_{s;i;k} + A q_{b;k}. \quad (2)$$

В формуле (2) к расчетным значениям сопротивлений R_s и R_b вводятся эмпирические коэффициенты в зависимости от способа определения характеристических значений $q_{s;i;k}$ и $q_{b;k}$ и способа изготовления сваи. Таким образом, расчет несущей способности приобретает вид

$$F_d = \frac{R_s}{\gamma_s} + \frac{R_b}{\gamma_b} = \frac{\sum u_i q_{s;i;k}}{\gamma_s} + \frac{A q_{b;k}}{\gamma_b}. \quad (3)$$

Согласно европейским нормам проектирования, параметры $q_{s;i;k}$ и $q_{b;k}$, отражающие влияние физико-механических характеристик грунта на несущую способность сваи, определяются опытным путем или теоретическим обоснованием, при этом нет конкретных указаний по их вычислению аналитическим способом. Руководство для проектировщиков к Еврокод 7 «Геотехническое проектирование» содержит частный пример расчета несущей способности буронабивной сваи круглого сечения в недренирующих глинах с использованием формулы (2). В качестве основного параметра, влияющего на значения $q_{s;i;k}$ и $q_{b;k}$, выступает прочность недренированного грунта на сдвиг c_u . Формула (2) принимает вид

$$F_d = \pi d L \alpha_l c_{u,shaft} + \frac{\pi d^2}{4} 9 c_{u,base}. \quad (4)$$

Результат определения несущей способности набивной сваи в раскатанной скважине по формуле (4) будет иметь некоторые погрешности и неточности. Во-первых, используется параметр прочности недренированного грунта на сдвиг c_u , а значит, значение несущей способности сваи в ряде грунтовых условий может быть определено с существенным запасом. Параметр c_u в расчетах несущей способности грунта целесообразен в случае быстрой передачи нагрузки на основания в процессе строительства или эксплуатации сооружения, отсутствия в основании дренирующих слоев грунта или

дренирующих устройств. Во-вторых, не учитывается неравномерность изменения диаметра сваи.

Техническая документация, разработанная для проектирования и изготавления набивных свай в раскатанных скважинах, по большей части, содержит требования и рекомендации к технологии и оборудованию. Специалистами ГУП НИИОСП им. Н.М. Герсанова предложено определять несущую способность набивной сваи в раскатанной скважине как сумму несущей способности цилиндрической и конической частей

$$F_d = u \sum h_i f_i + \sum h_{0i} (u_{0i} f_i + u_{0i} i_p E_i k_i \xi_r). \quad (5)$$

Формула (5) в связи с использованием f_i с точки зрения ее применения для расчета набивных свай в раскатанных скважинах обладает теми же недостатками, что и формула (1). Кроме того, формула (5) также не учитывает неравномерность изменения диаметра сваи по глубине.

Для повышения точности расчета несущей способности набивной сваи, выполненной в раскатанной скважине, проведена серия полевых испытаний таких свай статически вдавливающей нагрузкой. Испытания выполнялись на опытной площадке в г. Новосибирске, сложенной легкими песчанистыми суглинками мягкопластичной консистенции. В лабораторных условиях определены прочностные и деформационные характеристики грунта.

На опытной площадке было изготовлено 7 набивных свай в раскатанных скважинах длиной 4,2 м. При изготовлении свай использовался раскатывающий рабочий орган длиной 1,0 м, диаметром 250 мм с наклоном боковых граней 0,125 д.е. Для каждой набивной сваи определялась несущая способность экспериментальным путем с последующей обработкой результатов опытов и получением фактической несущей способности сваи F_d^ϕ (рисунок).



Фото полевого определения несущей способности сваи

По завершению полевых испытаний выполнялась статистическая обработка полученных частных значений несущей способности свай. При этом коэффициент вариации и среднеквадратическое отклонение составили 0,01 и 1,55 соответственно. Далее с использованием распределения Стьюдента определялось значение фактической несущей способности свай F_d^ϕ при доверительной вероятности $P = 0,95$.

В таблице представлено сравнение значений фактической несущей способности свай F_d^ϕ с расчетными F_d , определенными по формулам (1), (4) и (5).

Фактические и расчетные значения несущей способности набивной сваи, выполненной с применением метода раскатки скважин

Несущая способность	Формула (1)	Формула (4)	Формула (5)	По опытам	При $P = 0,95$
Расчетная F_d , кН	70,3	67,1	76,1	—	—
Фактическая F_d^ϕ , кН	—	—	—	142,3	139,7
				140,3	
				139,8	
				142,3	
				142,6	
				138,5	
				140,3	

Анализируя таблицу, можно отметить, что отклонение расчетных значений несущей способности свай от фактической несущей способности составляет от 45 до 52 %. Подобный запас несущей способности говорит о несовершенстве расчетных способов.

Наибольшим запасом обладает формула (4), приведенная в Еврокод 7, – 52 %. Подобное отклонение расчетного значения от фактического объясняется применением в формуле (4) характеристических параметров $q_{s;i;k}$ и $q_{b;k}$, определяемых с помощью c_u , как для нестабилизированного состояния грунта. Фактическая работа свай как при строительстве и эксплуатации сооружения, так и при испытаниях не подразумевает мгновенного восприятия вертикальной нагрузки. Передача статической нагрузки на сваю в процессе испытаний выполнялась ступенями после стабилизации деформаций в грунтах. Таким образом, поровое давление в грунтах успевало полностью или частично рассеяться, и применение c_u в расчетах занизило несущую способность свай.

Отклонение значения несущей способности свай, полученной по формуле (1), – 50 % объясняется использованием в расчете табличных значений R и f_i , зависящих от I_L и не учитывающих уплотнение грунта вокруг набивной сваи.

Лучший результат дает использование формулы (5). Однако запас несущей способности в 45 % необоснован и при проектировании экономически нецелесообразен. Подобное отклонение значений объясняется также применением табличных значений f_i , не учитывающих изменение физико-механических характеристик грунта при раскатке. Кроме того, формула (5) рассмат-

ридает цилиндрическо-коническую форму сваи с уклоном боковой поверхности сваи, не превышающим $i_p = 0,025$ д.е. Учитывая опыт работ по раскатке скважин и изготовлению набивных свай, в СМР используются рабочие органы с величиной $i_p > 0,025$ д.е., в связи с чем требуется корректировка расчетного способа.

В целом, анализируя возможные расчетные способы определения несущей способности свай, можно выделить основные проблемы их использования для набивных свай в раскатанных скважинах:

- 1) не в полной мере учтена форма конической части набивной сваи;
- 2) не учитываются прочностные характеристики грунта на контакте с набивной сваей, измененные в процессе раскатки скважины;
- 3) не учитывается неравномерное изменение диаметра сваи по глубине;
- 4) в расчетах используются табличные значения, зависящие от показателя консистенции грунта I_L .

Для учета формы конической части набивной сваи при применении раскатчиков с $i_p > 0,025$ д.е. несущую способность набивной сваи в пределах конической части целесообразнее рассматривать как для пирамидальных свай

$$F_d^k = \sum S_i \cos \alpha [p_i (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi_i^I) + c_i^I]. \quad (6)$$

Параметр p_i в соответствии с рекомендациями нормативных документов можно определить по формуле

$$p_i = \left[\frac{E_i}{4p_{0,i}(1-v_i^2) - 2p_{0,i}(2-v_i)} \right]^{\xi} (p_{p,i} + c_i^I \operatorname{ctg} \varphi_i^I) - c_i^I \operatorname{ctg} \varphi_i^I, \quad (7)$$

давление грунта $p_{0,i}$, $p_{p,i}$, кПа:

$$p_{0,i} = \frac{v_i}{1-v_i} \gamma_i^I h_i, \quad (8)$$

$$p_{p,i} = p_{0,i} (1 + \sin \varphi_i^I) + c_i^I \cos \varphi_i^I. \quad (9)$$

Применение формул (6)–(9) в расчетах несущей способности набивной сваи в пределах конической части позволяет учитывать прочностные и деформационные характеристики грунта. Задача по определению изменения прочностных характеристик грунта при раскатке скважины была решена в [7] и основывается на вычислении коэффициента пористости грунта после уплотнения e_y и показателя текучести I_L :

$$C = f(e_y, I_L); \quad (10)$$

$$\varphi = f(e_y, I_L); \quad (11)$$

$$e_y = e - \frac{T}{1+K\left(\frac{r-r_{cb}}{r_{cb}}\right)^n}. \quad (12)$$

Изменение диаметра набивной сваи по глубине зависит от грунтовых условий. Фактический диаметр набивной сваи d^Φ , зависящей от параметров раскатчика скважин и грунтовых условий, принимает вид

$$d^\Phi = f(d_0, e, I_L). \quad (13)$$

Задача по учету грунтовых условий при определении фактического диаметра сваи решена в [8]. Таким образом, фактический диаметр набивной сваи может быть установлен на основании полученных эмпирических зависимостей [8].

Неравномерность изменения диаметра сваи по глубине может быть учтена при выполнении расчетов по секциям ствола сваи. При этом необходимо ствол сваи разбивать на отдельные сечения периметром $u_i = \pi d_i^\Phi$.

Решение вопроса использования параметра f_i , характеризующего взаимодействие грунта со сваей, заключается в изучении процессов, происходящих на контакте уплотненного от раскатки грунта с боковой поверхностью набивной сваи. Анализ работ Б.В. Дерягина [9], Е.М. Сергеева [10] и Н.И. Безухова [11] позволяет сделать вывод, что для описания работы грунта на контакте с боковой поверхностью сваи необходимо учитывать следующие параметры:

- трение, учитывающее шероховатость поверхности и силу молекулярного взаимодействия между контактирующими поверхностями;
- липкость грунта, учитывающая взаимодействие молекул связной воды, частиц грунта с поверхностью сваи;
- ползучесть грунта.

Учет всех параметров для набивных свай в раскатанных скважинах в настоящее время требует проведения дополнительных экспериментальных исследований. В связи с чем на данном этапе решения вопроса, связанного с повышением точности расчета несущей способности набивной сваи в раскатанной скважине, величину f_i можно получить, используя реакции упругого отпора и коэффициент шероховатости в пределах расчетного грунтового слоя [12]. Приняв в качестве бокового давления в упругом цилиндре сцепление грунта, уточненная величина f'_i , характеризующая сопротивление по боковой поверхности, может быть определена по формуле [12, 13]

$$f'_i = \pi d_i^\Phi c_i \operatorname{tg} \varphi_i. \quad (14)$$

Кроме того, для определения несущей способности сваи возможно рассчитать трение грунта по боковой поверхности сваи, основываясь на известных законах механики грунтов. Трение τ_i может быть установлено

$$\tau_i = \theta \operatorname{tg} \varphi_i + c_i^1. \quad (15)$$

Боковое давление грунта на сваю θ в i -м расчетном грунтовом слое зависит от бытового давления грунта на расчетной глубине, грунтовых условий и условий раскатки скважин и определяется расчетным или экспериментальным путем.

Таким образом, расчет несущей способности набивной сваи, выполненной в раскатанной скважине, заключается в определении несущей

способности по боковой поверхности ствола сваи переменного сечения и по конусу

$$F_d^P = F_d^{CT} + F_d^{КОН}. \quad (16)$$

Расчет несущей способности по боковой поверхности ствола сваи переменного сечения F_d^{CT} можно выполнять двумя способами по формуле (6) и (14) или (15):

$$F_d^P = \pi \sum d_i^\phi h_i c_i \operatorname{tg} \varphi_i + \sum S_i [p_i (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi_i^I) + c_i^I] \cos \alpha; \quad (17)$$

$$F_d^P = \pi \sum d_i^\phi h_i (\theta \operatorname{tg} \varphi_i^1 + c_i^1) + \sum S_i [p_i (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \varphi_i^I) + c_i^I] \cos \alpha. \quad (18)$$

Оценка эффективности предлагаемых формул (17) и (18) выполнена путем сопоставления расчетной несущей способности набивной сваи в раскатанной скважине F_d^P для грунтовых условий опытной площадки с фактическим значением, полученным экспериментальным путем F_d^ϕ . Расчеты выполнены с использованием уточненных значений прочностных характеристик грунта, уплотненного в околосвайном пространстве, $c = f(e_y, I_L)$ и $\varphi = f(e_y, I_L)$.

Расчетная F_d^P , кН:

– формула (17) 90,1

– формула (18) 130,7

Фактическая F_d^ϕ , кН 139,7

В результате расчетов несущей способности сваи было установлено, что выражение (17) позволяет получить существенный запас в 35 %. В то время как формула (18) дает возможность значительно увеличить точность расчета, что представляет наибольший интерес при проектировании. Отклонение для значения F_d^P по (18) составляет около 7 % от фактического значения.

Вывод. В результате анализа способов расчета несущей способности свай был выявлен и подтвержден ряд недостатков формул при их применении для набивных свай в раскатанных скважинах. Основной проблемой является использование в стандартных методиках табличных значений параметров, характеризующих сопротивление грунта под нижним концом сваи и по боковой поверхности в зависимости от показателя консистенции грунта. Не учитываются и непостоянная по глубине форма ствола сваи и наличие конуса.

Для решения проблемы и повышения точности расчета несущей способности набивной сваи, выполненной в раскатанной скважине, предложен способ расчета, основанный на определении несущей способности по боковой поверхности ствола сваи переменного сечения и по конусу, который отражен в формуле (18). В расчете учитывается неравномерность изменения диаметра сваи по глубине, влияние эффекта от уплотнения грунта в околосвайном пространстве, а также фактические прочностные характеристики уплотненного грунта в околосвайном пространстве $c = f(e_y, I_L)$ и $\varphi = f(e_y, I_L)$. Натурные испытания статически вдавливающими нагрузками подтвердили адекватность предложенной методики расчета несущей способности набивной сваи по грунту, выполненной в раскатанной скважине.

Для уточнения граничных условий применимости формулы (18) в дальнейшем планируется:

- 1) выполнить дополнительные натурные испытания грунтов набивными сваями в раскатанных скважинах статически вдавливающими нагрузками в различных грунтовых условиях;
- 2) определить напряжения, возникающие в грунте в процессе раскатки скважины;
- 3) выполнить численное моделирование работы набивной сваи в раскатанной скважине с расчетом напряжений, возникающих на контакте грунта с боковой поверхностью сваи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Саурин А.Н. Набивные сваи в раскатанных скважинах – перспективное основание для устройства фундаментов в сложных грунтовых и построенных условиях // Тр. междунар. семинара по механике грунтов, фундаментостроению и трансп. сооружениям. М., 2000. С. 236–239.
2. Ланис А.Л., Разуваев Д.А. Усиление грунтов земляного полотна на подходах к мостам и путепроводам // Вестн. Ростов. гос. ун-та путей сообщения. 2016. № 3. С. 97–104.
3. Вайгандт А.А., Торонцова Е. Применение набивных свай в раскатанных скважинах // Организация и технология строительного производства: экспресс-информ. / Минпромстрой СССР, ЦБНТИ. 1988. Вып. 3. С. 14–17.
4. Саурин А.Н. Сваи в раскатанных скважинах // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2005. № 12. С. 42–43.
5. Нарбут Р.М. Работа свай в глинистых грунтах. Л.: Стройиздат, 1972. 210 с.
6. Лапшин Ф.К. Расчет оснований одиночных свай на вертикальную нагрузку: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: (05.23.02) / [Науч.-исслед., проектно-изыск. и констр.-технол. ин-т оснований и подзем. сооружений им. П.Н. Герсеванова]. М., 1988. 43 с.
7. Ломов П.О. Определение коэффициента пористости грунта, уплотненного методом раскатки скважин // Вестн. гражд. инженеров. 2015. № 6. С. 94–100.
8. Ломов П.О., Ланис А.Л. К вопросу определения грунтовых параметров, оказывающих влияние на диаметр раскатанной скважины // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2015. № 3. С. 92–97.
9. Дерягин Б.В. Что такое трение. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 154 с.
10. Сергеев Е.М. [и др.]. Грунтоведение. Гл. 7: Липкость грунтов. М.: Изд-во МГУ, 1971. 151 с.
11. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М., 1961. 150 с.
12. Шадунец К.Ш. О взаимодействии боковой поверхности свай с окружающим их грунтом основания // Политехнический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2006. № 19. С. 39–48.
13. Бондарик Г.К., Комаров И.С., Ферронский В.И. Полевые методы инженерно-геологических исследований. М.: Недра, 1967.

Ланис Алексей Леонидович, канд. техн. наук, доц.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
Воробьев Валерий Степанович, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск
Разуваев Денис Алексеевич, канд. техн. наук

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Ломов Петр Олегович, канд. техн. наук

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено после доработки 01.08.17

Lanis Aleksey Leonidovich, PhD, Ass. Professor

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Vorob'ev Valeriy Stepanovich, DSc, Professor

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Razuvayev Denis Alekseevich, PhD

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Lomov Petr Olegovich, PhD

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

DETERMINING THE CAST-IN-SITU PILE RESISTANCE PERFORMED IN THE UNROLLED WELL

The increase in the efficiency of the design of a cast-in-situ pile in unrolled well is based on the development of a refined technique for calculation of pile resistance. The domestic and foreign normative and scientific literature has been analyzed on this issue. A new calculation method is proposed, which takes into account the unevenness of the pile diameter variation in depth, influence of effect on the soil compaction in the near-well space and the actual strength characteristics of the compacted soil in the near-shell space, based on practical experience and experimental field studies on real construction sites.

K e y w o r d s: cast-in-situ piles, unrolled well, pile resistance, soil compaction, calculation of pile resistance.

REFERENCES

1. Saurin A.N. Nabivnye svai v raskatannykh skvazhinakh – perspektivnoe osnovanie dlya ustroystva fundamentov v slozhnykh gruntovykh postroechnykh usloviyakh [Built-in-place piles in rolled out wells is a promising basis for the installation of foundations in difficult soil and built conditions]. Tr. mezhdunar. seminara po mekhanike gruntov, fundamentostroeniyu i transp. sooruzheniyam [Third international seminar on soil mechanics, foundation engineering and transport structures]. Moscow, 2000. Pp. 236–239. (in Russian)
2. Lanis A.L., Razuvayev D.A. Usilenie gruntov zemlyanogo polotna na podkhodakh k mostam i puteprovodam [Reinforcement of soil subgrade on the approaches to bridges and overpasses]. Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya [Bulletin of the Rostov state transport University]. 2016. No. 3. Pp. 97–104. (in Russian)
3. Wagyandt A.A., Toronto E. Primenenie nabivnykh svay v raskatannykh skvazhinakh [The use of piles in rolled wells]. Organizatsiya i tekhnologiya stroitel'nogo proizvodstva [Organization and technology of construction production]. 1988. Vol. 3. Pp. 14–17. (in Russian)
4. Saurin A.N. Svai v raskatannykh skvazhinakh [Piles in rolled wells]. Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka [Building materials, equipment, technologies of XXI century]. 2005. No. 12. Pp. 42–43. (in Russian)
5. Narbut R.M. Rabota svay v glinistykh gruntakh [Work piles in clay soils]. Leningrad, 1972. 210 p. (in Russian)
6. Lapshin F.K. Raschet osnovaniy odinochnykh svay na vertikal'nyuyu nagruzku: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [Foundation analysis of single piles for vertical loads: abstract PhD]. Moscow, 1988. 43 p. (in Russian)

7. L o m o v P.O. Opredelenie koefitsienta poristosti grunta, uplotnennogo metodom raskatki skvazhin [Determining the pore-solids ratio of strengthened subgrade by soil flaring]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of civil engineers]. 2015. No. 6. Pp. 94–100. (in Russian)
 8. L o m o v P.O., L a n i s A.L. K voprosu opredeleniya gruntovykh parametrov, okazyvayushchikh vliyanie na diametr raskatannoy skvazhiny [On the determination soil parameters influencing the roll out diameter well]. Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka [Scientific problems of transport in Siberia and the Far East]. 2015. No. 3. Pp. 92–97. (in Russian)
 9. D e r y a g i n B.V. Chto takoe trenie [What is friction]. Moscow, 1963. 154 p. (in Russian)
 10. S e r g e e v E.M. et al. Gruntovedenie [Soil science]. Moscow, 1971. 151 p. (in Russian)
 11. B e z u k h o v N.I. Osnovy teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti [Fundamentals of the theory of elasticity, plasticity and creep]. Moscow, 1961. 150 p. (in Russian)
 12. S h a d u n t s K.Sh. O vzaimodeystvii bokovoy poverkhnosti svay s okruzhayushchim ikh gruntom osnovaniya [On the interaction of the side surface of a pile with the grounding ground of the substrate]. Politekhnicheskiy setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Polytechnical network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University]. 2006. No. 19. Pp. 39–48. (in Russian)
 13. B o n d a r i k G.K., K o m a r o v I.S., F e r r o n s k i y V.I. Polevye metody inzhenerno-geologicheskikh issledovaniy [Field methods of engineering-geological research]. Moscow, 1967. (in Russian)
-

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ



УДК 691.54:620.18

Л.В. ИЛЬИНА, Н.О. ГИЧКО, А.Н. ТЕПЛОВ, А.К. ТУЛЯГАНОВ

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И ПОРИСТОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ ПРИ ВВЕДЕНИИ ДИСПЕРСНОГО ИЗВЕСТНИКА

Результаты оценки влияния дисперсного известняка на структуру цементного камня показали, что при введении известняка отмечается существенное различие в содержании пор диаметром менее 1,2 мкм, при этом их общий объем и соответственно суммарная поверхность возрастают. Основная доля суммарной поверхности (более 95 %) приходится на поры диаметром 0,15 мкм и менее. При введении 7 мас. % известняка характеристическая длина пор возрастает, в то же время существенно снижается извилистость пор. В цементном камне без добавок структура достаточно рыхлая, с большим количеством контракционных пор размерами до 0,05 мм. Цементный камень с введенным дисперсным известняком обладает более плотной, однородной и мелко-кристаллической структурой, содержащей поры диаметром 0,15 мкм и менее.

Ключевые слова: известняк, цементный камень, микроструктура, поры, поровая структура, объем пор, суммарная поверхность пор, характеристическая длина пор.

В объеме затвердевшего цементного камня значительную долю занимают поры и пустоты различных размеров, их характеристики зависят от водоцементного отношения, способа уплотнения, сроков и условий твердения, минералогического и вещественного состава портландцемента [1–4]. Пористость оказывает большое влияние на все свойства цементов и получаемых с их использованием строительных материалов, причем это влияние зависит не только от показателя суммарной пористости, большое значение имеет структура пористости, характеризуемая объемом пор различного диаметра [5–8]. В цементном камне присутствуют все виды пор (от ультрамалых до макропор), они беспорядочно распределены в теле камня, имеют различный диаметр и конфигурацию. Поры могут соединяться друг с другом, образуя сложные каналы в структуре материала, общая пористость цементного камня может достигать 30 %. Важное значение имеет однородное распределение пористости, наиболее существенно влияют на прочность цемента крупные поры [5, 6, 8].

При решении вопроса об использовании карбонатных добавок в цементных материалах необходимо учитывать, что большое влияние на прочност-

ные свойства оказывают условия твердения. Наиболее благоприятные результаты получаются при твердении в нормальных условиях [1, 5, 9, 10].

Для изучения пористости исследован цементный камень после 28 сут твердения при нормальных условиях, который изготавливался как без добавок, так и с добавкой дисперсного известняка.

В качестве вяжущего в работе использовался портландцемент производства ООО «Искитимцемент» (Новосибирская область) марки ЦЕМ II/A-III 32,5. Минеральный состав его, мас. %: C_3S – 60; C_2S – 16; C_3A – 7,3; C_4AF – 14. Удельная поверхность составила $300\text{ м}^2/\text{кг}$. Химический состав цемента, мас. %: SiO_2 – 20,7; Al_2O_3 – 6,3; Fe_2O_3 – 4,6; CaO – 65,4; MgO – 1,3; SO_3 – 0,4; п.п.п. – 0,5.

В качестве минеральной добавки в работе использовался дисперсный известняк (г. Искитим, Новосибирская область), который является отходом горнодобывающей промышленности. Химический состав известняка, мас. %: SiO_2 – 0,5; Al_2O_3 – 0,2; Fe_2O_3 – 0,1; CaO – 54,7; MgO – 0,5; п.п.п. – 40,4. Дисперсность известняковой муки оценивалась по площади удельной поверхности, определенной на приборе по ПСХ-4 и по данным лазерной гранулометрии. Площадь удельной поверхности составляла $400\text{ м}^2/\text{кг}$. Средний диаметр частицы известняка 27 мкм. Результаты лазерной гранулометрии приведены на рис. 1.

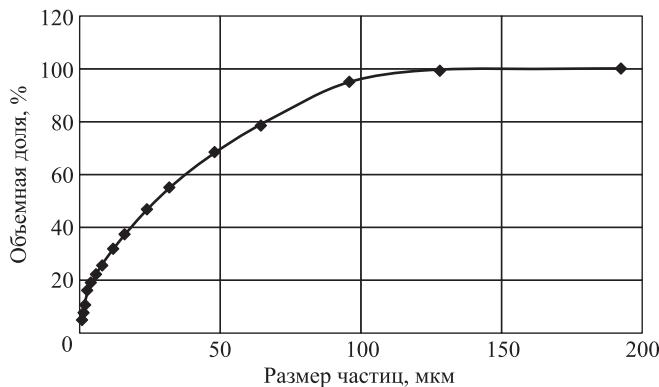


Рис. 1. Распределение размеров частиц известняковой муки

Дисперсный известняк вводился в количестве 7 % от массы портландцемента. Портландцемент смешивали с известняком в шаровой мельнице в течение 1,5 ч.

Структурные характеристики образцов исследовали на автоматизированном ртутном поромере (порозиметре) AutoPore IV 9520 фирмы Micromeritics (США), управляемом персональным компьютером, который имел пределы измерения размеров (диаметров) пор от 3,7 до 7500 нм. Для определения объема вдавленной ртути в поромере применяли электроемкостную систему регистрации. Специальная приставка, заполненная ртутью, позволяла осуществлять эту операцию при вакуумировании, что исключало неполное удаление воздуха из образца перед испытанием. Значения поверхностного натяжения ртути и угол смачивания принимали следующими: $\sigma = 480\text{ мН/м}$; $\Theta = 141,3^\circ$. Процесс эксперимента контролировали компьютером по специальной программе Milestone-100-software фирмы Fisons.

Изменение структуры и пористости цементного камня...

Т а б л и ц а 1. Пористость цементного камня по результатам ртутной порометрии

Характеристики	Состав вяжущего вещества	
	портландцемент	портландцемент и 7 мас. % известняка
Общий объем пор, см ³ /г	0,2741	0,3054
Суммарная удельная поверхность пор, м ² /г	26,820	28,805
Медиана диаметра пор, соответствующая медиане их распределения по объему, мкм	0,0680	0,0520
Средний диаметр пор, соответствующий медиане их распределения по поверхности, мкм	0,0057	0,0041
Характеристическая длина пор, мкм	1,640	1,690
Извилистость пор, отн. ед.	183,27	159,620

Полученные результаты свидетельствуют о том, что введение 7 мас. % известняка приводит к увеличению общего объема пор и их суммарной поверхности соответственно с 0,2741 до 0,3054 см³/г и с 26,820 до 28,805 м²/г по сравнению с цементным камнем без добавок (табл. 1).

Анализ данных показал, что существенное различие отмечается в содержании пор диаметром менее 1,2 мкм. Их общий объем и соответственно суммарная поверхность возрастают при введении добавки известняка. При этом основная доля суммарной поверхности (более 95 %) приходится на поры диаметром 0,15 мкм и менее.

Следует отметить, что указанные отличия в объеме пор малых размеров четко проявляются как в случае повышения давления ртути (табл. 2), так и при его снижении. На рис. 2 приведена интегральная кривая распределения структурной пористости образцов цементного камня без добавок (1) и с добавкой 7 мас. % известняка (2).

Рассматривая пористость цементного камня и результаты ртутной порометрии, можно отметить следующее: при введении 7 мас. % известняка характеристическая длина пор возрастает. В то же время существенно снижается извилистость пор. Это может повысить морозостойкость путем обеспечения более благоприятных условий для перемещения части воды при ее замерзании в соседние воздушные включения.

Т а б л и ц а 2. Характеристики пористости цементного камня по результатам ртутной порометрии (повышение давления)

Средний диаметр пор, мкм	Состав вяжущего вещества			
	Портландцемент		Портландцемент и 7 мас. % известняка	
	объем пор, см ³ /г	площадь пор, см ² /г	объем пор, см ³ /г	площадь пор, см ² /г
73,1–361,0	0,0919	0,002	0,1008	0,003
15,4–73,1	0,0115	0,002	0,0162	0,003
1,2–15,4	0,0164	0,033	0,0160	0,031
0,15–1,2	0,0513	1,059	0,0570	1,349
0,003–0,15	0,1030	25,724	0,1154	27,419
И т о г о	0,2741	26,820	0,3054	28,805

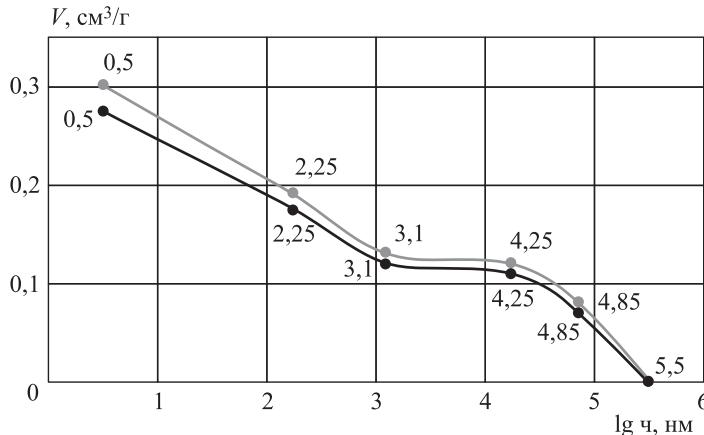


Рис. 2. Интегральная кривая распределения структурной пористости образцов цементного камня без добавок (1) и с добавкой 7 мас. % дисперсного известняка (2)

Повышение морозостойкости может быть во многом обусловлено изменением структуры цементного камня при введении добавок, размеров пор и их распределения. Необходимо учесть, что значительная часть воды в порах цементного камня находится в адсорбционных слоях на поверхности пор. Вода, адсорбированная на поверхности твердого тела, как показывают многочисленные опубликованные данные, значительно отличается по своим свойствам от объемной воды [8, 11, 12]. Структурные изменения поверхностных слоев воды обусловлены эпитетаксиальным влиянием твердого тела (подложки). Расстояния, на которые действуют поверхностные силы твердого тела, изменяющие строение и свойства воды, уменьшаются при снижении гидрофильтрности подложки и повышении температуры.

Толщина адсорбционных пленок может составлять от десятых долей микрометра до 2 мкм. В тонких пленках воды, находящихся в энергетическом поле твердого тела, происходит увеличение степени упорядоченности распределения молекул и изменение структурных тетраэдров, что приводит соответственно к изменению плотности воды и комплекса других ее свойств [8, 11, 12].

Из литературы известно, что температурный минимум объема (максимальная плотность) воды, адсорбированной на поверхности, при толщине пленки 0,6 мкм сдвигается в область отрицательных температур. Таким образом, адсорбированная на поверхности частиц цемента вода имеет ориентированную структуру и измененные свойства. Это так называемая «пленочная вода». Температура ее замерзания менее -20°C . Толщина слоя пленочной воды, по литературным данным, составляет 0,2–0,6 мкм, т. е. в порах диаметром менее 1 мкм вода замерзать не будет [8, 11, 12].

Для дальнейшего выявления причин повышения прочности цементного камня при введении дисперсного известняка изучалась микроструктура цементного камня как с добавкой, так и без нее при различном увеличении. Для этого использовался сканирующий электронный микроскоп Hitachi TM 1000 Hitachi Science Systems Ltd, который имел степень увеличения от 20 до 10 000.

В цементном камне без добавок структура достаточно рыхлая, с большим количеством контракционных пор размерами до 0,05 мм; цементный камень с добавкой дисперсного известняка более плотный, поры значительно мельче. При увеличении тех же образцов в 1000 раз (рис. 3) наблюдается большое количество микропор между образованиями.

Рассмотрим структуру цементного камня с добавкой и без нее в различные сроки твердения (рис. 4).

Электронно-микроскопическими исследованиями подтверждается, что цементный камень с введенным дисперсным известняком обладает более плотной, однородной и мелкокристаллической структурой с малым количеством пор во все исследуемые сроки твердения.

Таким образом, при введении известняка отмечается существенное различие в содержании пор диаметром менее 1,2 мкм, при этом их общий объем и соответственно суммарная поверхность возрастают. Основная доля суммарной поверхности (более 95 %) приходится на поры диаметром 0,15 мкм и менее. Следует отметить, что при введении 7 мас. % известняка характеристическая длина пор возрастает, в то же время существенно снижается извилистость пор.

В цементном камне без добавок структура достаточно рыхлая, с большим количеством контракционных пор размерами до 0,05 мм. Цементный камень с введенным дисперсным известняком обладает более плотной, одно-

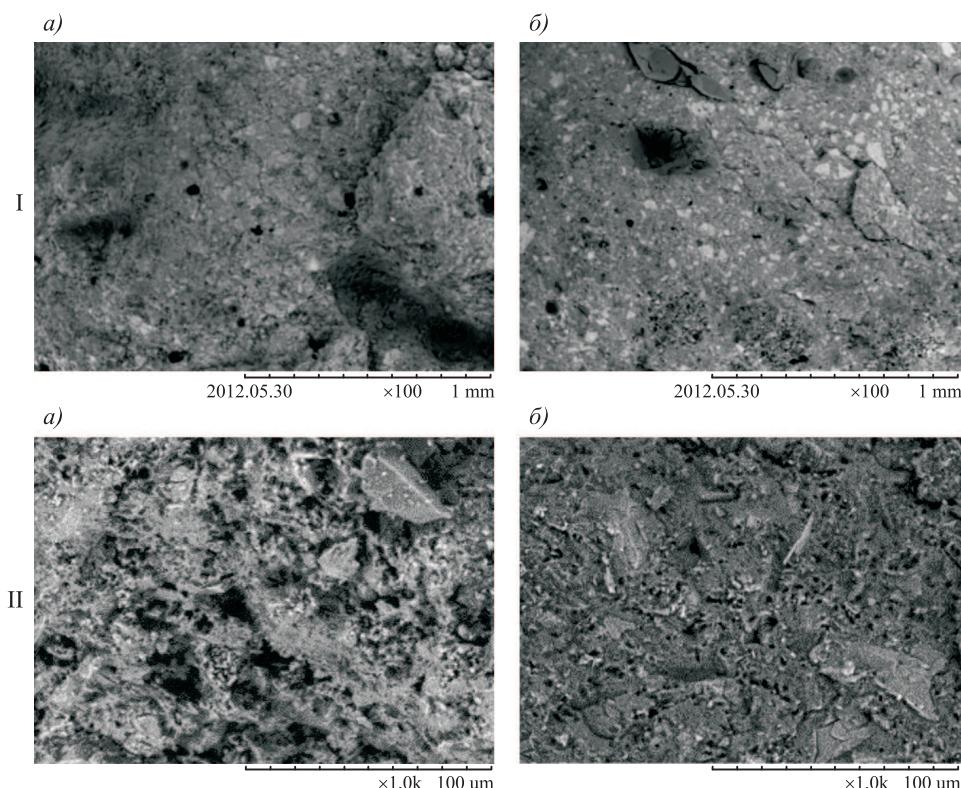


Рис. 3. Структура цементного камня в возрасте 28 сут с увеличением в 100 (I) и 1000 (II) раз

a – цементный камень; б – цементный камень с добавкой дисперсного известняка

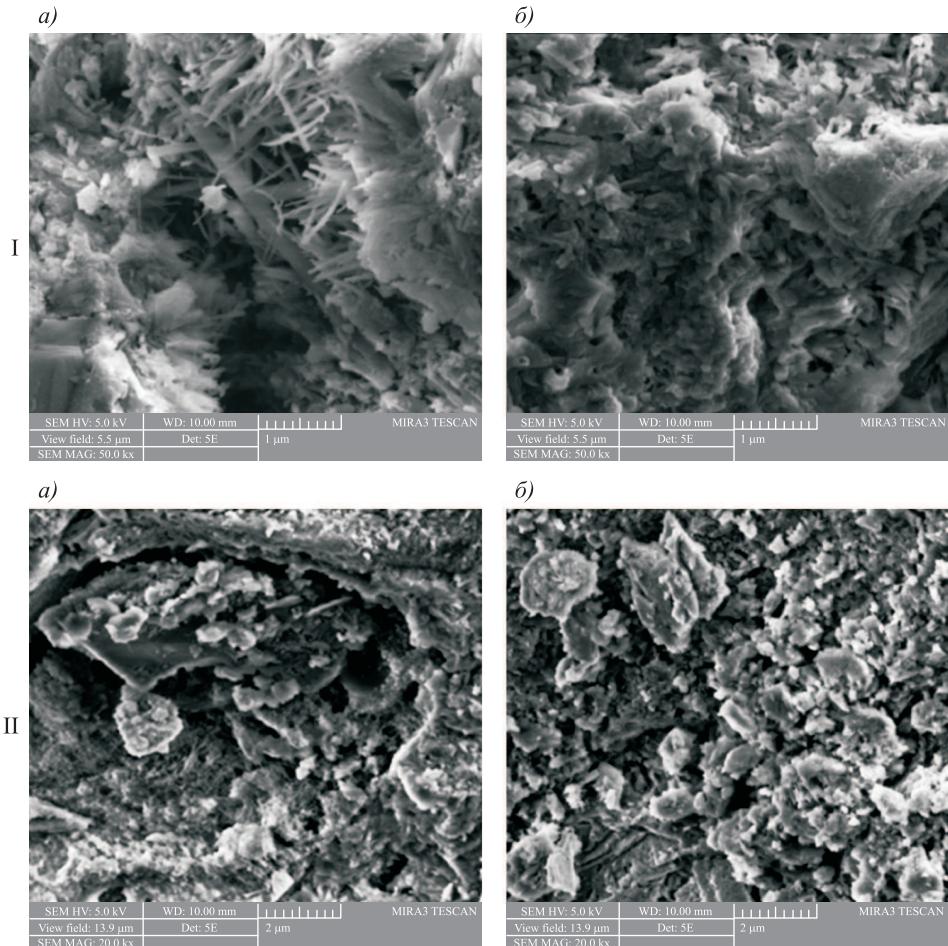


Рис. 4. Структура цементного камня в возрасте 7 (I) и 28 (II) сут с увеличением в 10 000 раз
а – цементный камень; б – цементный камень с добавкой дисперсного известняка

родной и мелкокристаллической структурой, содержащей поры диаметром 0,15 мкм и менее. Это может обеспечить более благоприятные условия для перемещения части воды в соседние воздушные включения. При ее замерзании давление внутри искусственного конгломерата не будет увеличиваться. Наличие большого количества пор (капилляров) малого диаметра (менее 1 мкм) может способствовать повышению морозостойкости бетона, так как вода в них в основном будет находиться в пленочном состоянии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимашев В.В., Колбасов В.М. Свойства цементов с карбонатными добавками // Цемент. 1981. № 10. С. 10–12.
2. Peiyu Yan, Guidong Mi and Qiang Wang. A comparison of early hydration properties of cement-steel slag binder and cement-limestone powder binder // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2014. Vol. 115, No. 1. P. 193–200.
3. Berra Mario. Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 35. P. 666–675.

4. Шахова Л.Д., Кучеров Д.Е. Микроструктура композиционных цементов // Цемент и его применение. 2010. № 5. С. 65–68.
5. Nadeem A b i b, Shazim Ali Memon and Tomm Yiu Lo. Mechanical performance, durability, qualitative and quantitative analysis of microstructure of fly ash and Metakaolin concrete at elevated temperatures // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 38. P. 338–347.
6. Козлова В.К., Карпова Ю.В., Вольф А.В. Состав алюминатно-алюмокальциевитальных фаз и их продукты гидратации в различных цементах и смешанных вяжущих: монография. Ч. 2: Продукты гидратации алюминатных фаз различных цементов и их участие в процессах коррозии бетонов. Барнаул, 2009. 186 с.
7. Бердов Г.И., Ильина Л.В., Никоненко Н.И., Машкин А.Н. Повышение прочности материалов из тонкодисперсных цементов введением техногенных минеральных микронаполнителей // Стройт. материалы. 2014. № 6. С. 46–49.
8. Ильина Л.В. Повышение эксплуатационных характеристик строительных материалов на основе цемента длительного хранения: Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 2011.
9. Нисневич М.Л., Сиротин Г.А. Использование отсевов дробления горных пород в технологии бетона // Стройт. материалы. 2003. № 11. С. 8–9.
10. Худякова Л.И., Войлошинков О.В. Строительные материалы на основе отходов горнодобывающей промышленности // Стройт. материалы. 2009. № 12. С. 16–17.
11. Дерягин Б.В. [и др.]. Свойство тонких слоев воды вблизи твердых поверхностей // Связанная вода в дисперсных системах. М.: Изд-во МГУ, 1980. Вып. 5. С. 4–13.
12. Мецик М.С. Свойства пленочной воды между пластинками слюды // Поверхностные силы в тонких пленках и дисперсных системах. М.: Наука, 1972. С. 189–194.

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

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Гичко Николай Олегович, магистр

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Теплов Александр Николаевич, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Туляганов Александр Константинович, асп.

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

Получено после доработки 25.08.17

Il'ina Liliya Vladimirovna, DSc, Professor

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

Gichko Nikolay Olegovich, MSc

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

Teplov Alexander Nikolaevich, Post-graduate Student

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

Tulyaganov Alexander Konstantinovich, Post-graduate Student

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

CHANGES OF THE STRUCTURE AND PERCUSSION OF CEMENT STONE AT THE INTRODUCTION OF THE DISPERSE LIMESTONE

The results of the evaluation of the effect of dispersed limestone on the structure of the cement stone showed that when limestone is introduced, there is a significant difference in the content of pores with a diameter of less than 1,2 μm , while their total volume and,

respectively, the total surface increase. The main part of the total surface (more than 95 %) falls on pores with a diameter of 0,15 μm or less. It should be noted that when 7 % wt. Limestone, the characteristic pore length increases, while the tortuosity of the pores is substantially reduced. In a cement stone without additives, the structure is rather loose, with a large number of contraction pores up to 0,05 mm in size. Cement stone with introduced limestone has a more dense, homogeneous and finely crystalline structure containing pores with a diameter of 0,15 μm or less. The neoplasms are mainly represented by large highly basic hydrosilicates and ettringite.

К e y w o r d s: limestone, cement stone, microstructure, pores, pore structure, pore volume, total pore surface, characteristic pore length.

REFERENCES

1. T i m a s h e v V.V., K o l b a s o v V.M. Svoystva tsementov s karbonatnymi dobavkami [Properties of cements with carbonate additives]. Tsement [Cement]. 1981. No. 10. Pp. 10–12. (in Russian)
2. Y a n P e i y u, G u i d o n g M i a n d Q i a n g W a n g. A comparison of early hydration properties of cement-steel slag binder and cement-limestone powder binder. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2014. Vol. 115, No. 1. Pp.193–200.
3. B e r r a M a r i o. Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes. Construction and Building Materials. 2012. Vol. 35. Pp. 666–675.
4. S h a k h o v a L.D., K u c h e r o v D.E. Mikrostruktura kompozitsionnykh tsementov [Microstructure of composite cements]. Tsement i ego primenenie [Cement and its Applications]. 2010. No. 5. Pp. 65–68. (in Russian)
5. N a d e e m A b i b, Sh a z i m A l i M e m o n and T o m m y Y i u L o. Mechanical performance, durability, qualitative and quantitative analysis of microstructure of fly ash and Metakaolin concrete at elevated temperatures. Construction and Building Materials. 2013. Vol. 38. Pp. 338–347.
6. K o z l o v a V.K., K a r p o v a Yu.V., V o l f A.V. Sostav alyuminatno-alyumoferritnykh faz i ikh produkty hidratatsii v razlichnykh tsementakh i smeshannykh vyazhushchikh: monografiya. Chast' 2: Produkty hidratatsii alyuminatnykh faz razlichnykh tsementov i ikh uchastie v protsessakh korrozii betonov [Composition of aluminate-alumina phases and their hydration products in various cements and mixed binders: monograph. Part II: Products of hydration of aluminate phases of various cements and their participation in the processes of corrosion of concretes]. Barnaul, 2009. 186 p. (in Russian)
7. B e r d o v G.I., I l ' i n a L.V., N i k o n e n k o N.I., M a s h k i n A.N. Povyshenie prochnosti materialov iz tonkodispersnykh tsementov vvedeniem tekhnogennyykh mineral'nykh mikronapolniteley [Increase of strength of materials from finely divided cements by introduction of man-made mineral micro-filters]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2014. No. 6. Pp. 46–49. (in Russian)
8. I l ' i n a L.V. Povyshenie ekspluatatsionnykh kharakteristik stroitel'nykh materialov na osnove tsementa dlite'l'nogo khraneniya: diss. ... kand. tekhn. nauk [Increasing the performance characteristics of building materials based on long-term storage cement: dis. PhD]. Novosibirsk, 2011. (in Russian)
9. N i s n e v i c h M.L., S i r o t i n G.A. Ispol'zovanie otsevov drobleniya gornykh porod v tekhnologii betona [The use of crushing of rock crushing in concrete technology]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2003. No. 11. Pp. 8–9. (in Russian)

10. K h u d y a k o v a L.I., V o y l o s h n i k o v O.V. Stroitel'nye materialy na osnove otkhodov gornodobyvayushchey promyshlennosti [Building materials based on waste from the mining industry]. Stroitel'nye materialy [Building materials]. 2009. No. 12. Pp. 16–17. (in Russian)
11. D e r y a g i n B.V. [et al.]. Svoystvo tonkikh sloev vody vblizi tverdykh poverkhnostey [The property of thin layers of water near hard surfaces]. Svyazannaya voda v dispersnykh sistemakh [Bound water in disperse systems]. Moscow, 1980. Vol. 5. Pp. 4–13. (in Russian)
12. M e t z i k M.S. Svoystva plenochnoy vody mezdu plastinkami slyudy [Properties of film water between mica plates]. Poverkhnostnye sily v tonkikh plenkakh i dispersnykh sistemakh [Surface forces in thin films and disperse systems]. Moscow: Nauka, 1972. Pp. 189–194. (in Russian)

УДК 691.16

А.И. ТРАУТВАИН, Е.А. ЯКОВЛЕВ, А.А. СИЛКО

ВЗАИМОСВЯЗЬ ДЕФОРМАТИВНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ И ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЯЖУЩИХ МАТЕРИАЛОВ*

Представлен анализ различных физико-механических характеристик битума для производства асфальтобетонных смесей, которые необходимо определять при контроле качества органического вяжущего согласно требованиям новых нормативных документов. Приведены результаты экспериментальных исследований основных характеристик различных полимербитумных вяжущих и образцов асфальтобетона на их основе. Показано, что наиболее важные эксплуатационные характеристики асфальтобетонных покрытий – водостойкость, водонасыщение и деформативная устойчивость – зависят от таких свойств органического вяжущего, как температура размягчения и хрупкости, а также сцепление с каменным материалом. Однако нормативные значения этих показателей по ГОСТ Р 52056 для полимербитумных вяжущих в дорожном строительстве не позволяют получить асфальтобетонное покрытие с высокими физико-механическими характеристиками, устойчивое к различным пластическим деформациям. Сделан вывод о том, что необходимо разрабатывать более высокие требования к современным органическим вяжущим для приготовления асфальтобетонных смесей по таким показателям, как температура размягчения, хрупкости и сцепление с каменным материалом. В статье представлены конкретные показатели свойств битума для получения определенных их значений.

Ключевые слова: полимербитумное вяжущее, асфальтобетон, деформационная устойчивость, нормативные требования, температура размягчения, температура хрупкости, адгезия.

Введение. В настоящее время большое влияние уделяется качеству органического вяжущего для приготовления асфальтобетонных смесей. Широкое распространение получило полимербитумное вяжущее, отличающееся от традиционного битума согласно ГОСТ 52056–2003 высокой эластичностью и температурой размягчения.

В связи с необходимостью разработки комплекса стандартов, регламентирующих технические требования и методики определения свойств битумов нефтяных дорожных вязких, гармонизированных с европейскими нормами, введена целая серия новых ГОСТов (33134–33143). Данные стандарты разработаны с учетом основных нормативных положений европейского регионального стандарта EN. Тем не менее позволяют ли эти требования получить асфальтобетонное покрытие, обладающее высокими эксплуатационными характеристиками, остается под вопросом.

* Работа выполнена в рамках реализации Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

Методология. В работе при изучении изменения физико-механических характеристик битума в результате введения в его состав полимеров и пластификаторов, а также влияния различных концентраций полимеров и пластификаторов на изменение свойств асфальтобетона использовано сертифицированное оборудование лабораторий БГТУ им. В.Г. Шухова. Обработка результатов проводилась качественным и количественным методами, в частности, методом корреляционного анализа, математико-статистической обработки. Исследование предусматривает дальнейшую разработку методологического подхода к получению устойчивого к пластическим деформациям асфальтобетона на основе различных модификаторов, повышающих физико-механические характеристики битума; выявления наиболее перспективных методов оценки деформативной устойчивости асфальтобетона для дорожного строительства.

Основная часть. Согласно ГОСТ 33133–2014 все требования к битумам разделены на основные и дополнительные, устанавливаемые исходя из региона применения битумов.

Основные показатели: глубина проникания иглы при 25 °C, растяжимость при 0 °C, температура размягчения по кольцу и шару, температура вспышки, температура хрупкости, изменение температуры размягчения после старения, изменение массы образца после старения.

К дополнительным характеристикам относятся: растяжимость при 25 °C, температура хрупкости после старения, глубина проникания иглы при 0 °C, растворимость, содержание твердых парафинов, индекс пенетрации. Также дополнительными показателями для набора статистических данных являются: усилие при растяжении при 25 °C, динамическая вязкость при 60 °C, изменение динамической вязкости в результате сдвигового воздействия, динамическая вязкость после старения, изменение динамической вязкости в результате сдвигового воздействия после старения, усилие при растяжении при 0 °C, температура хрупкости после старения. При оценке эффективности полимербитумного вяжущего дополнительно определяют его эластичность (ГОСТ Р 52056). Таким образом, для определения качества битумов для дорожного строительства имеется широкий набор показателей.

В зависимости от глубины проникания иглы при 25 °C или пенетрации вязкие дорожные нефтяные битумы классифицируют по маркам, т.е. марка битума характеризует его вязкость, а следовательно, область применения нефтяных дорожных битумов в дорожном строительстве. Однако битум с регламентированной областью применения (т.е. маркой) согласно ГОСТ 333133 и ГОСТ Р 52056 не всегда способствует получению качественного асфальтобетона и полимерасфальтобетона для данного региона (с учетом соблюдения всех требований по приготовлению и укладке асфальтобетонных смесей). Возможно это связано с тем, что значения показателей, характеризующих качество битумов для дорожного строительства, находятся в таких пределах, которые не позволяют получить деформационно-устойчивые асфальтобетонные покрытия.

На сегодняшний день основные дефекты асфальтобетонных покрытий связаны с его низкой деформативной устойчивостью при различных температурах эксплуатации. Известно, что на предел прочности при сжатии при 50 °C сдвигостойчивость, трещиностойкость, устойчивость к образованию

колеи асфальтобетона оказывает влияние вяжущее, используемое для его приготовления.

Во многих работах говорится о том, что сырье для производства дорожных битумов и технология их получения как в России, так и во всем мире не позволяют обеспечить четыре основных требования к органическим вяжущим материалам – битумы недостаточно трещиностойки, не теплостойки, не эластичны и не обладают требуемой адгезией к поверхности минеральных материалов кислых пород, что привело к многочисленным исследованиям, направленным на повышение качества битума до требуемого уровня путем введения добавок полимеров и поверхностно-активных веществ [1–8].

Однако теория и практика убедительно показывают, что в любых климатических условиях, при любой интенсивности и любом составе движения цементобетонные покрытия являются наиболее долговечными [9–14]. Так, фактический срок службы цементобетонных покрытий в США в среднем 26 лет, асфальтобетонных – 16. Прочностные и деформативные свойства цементобетона, в отличие от асфальтобетона, практически не зависят от температуры. Соответственно в современных цементобетонных покрытиях исключено образование колеи от пластических деформаций или износа, тогда как колейность является одним из наиболее распространенных дефектов современных дорог с асфальтобетонным покрытием в России. При этом устойчивость цементобетона к образованию колеи связана с высокой жесткостью данного материала, которая зависит, в первую очередь, от прочностных характеристик цементобетона при различных температурах. Поэтому при разработке асфальтобетонного покрытия, обладающего высокой деформативной устойчивостью, необходимо повышать его пределы прочности при сжатии при 20 и 50 °С одновременно.

При разработке такого асфальтобетонного покрытия необходимо использовать органическое вяжущее, обладающее определенными высокими физико-механическими характеристиками: температурой размягчения, температурой хрупкости и адгезией. При этом классифицировать битум по маркам, а также назначать область его применения можно также по вышеуказанным свойствам. Битум, обладающий высокой температурой размягчения, низкой температурой хрупкости и хорошим сцеплением с минеральными материалами, будет способствовать получению асфальтобетона с повышенной деформативной устойчивостью при различных температурах.

Оценка таких параметров, как глубина проникания иглы, растяжимость, кинематическая и динамическая вязкости, потеря массы после нагрева, связана с исследованием реологических свойств битума и может быть использована в технологии приготовления асфальтобетонных смесей. При этом по температуре размягчения вяжущего также можно судить о технологических свойствах материала.

Важно отметить, что ГОСТ 33133 не регламентирует определение качества сцепления битума с каменными материалами, а в соответствии с ГОСТ Р 52056, вяжущее должно выдерживать сцепление только по контрольному образцу № 2. Несмотря на это, считаем, что данный показатель является одним из самых важных свойств при определении качества битума для асфальтобетонных смесей. В первую очередь, это связано с тем, что битум

представляет собой смесь углеводородов и их азотистых, кислородистых, сернистых и металлоксодержащих производных, которые имеют плохое сродство с минеральными материалами, в частности, кислыми. Поэтому использование битума в составе асфальтобетонных смесей, удовлетворяющего всем требованиям ГОСТ 33133 или ГОСТ Р 52056, но имеющего низкую адгезию к каменным материалам, будет способствовать отслоению пленки вяжущего с поверхности каменного материала. Влага, проникающая в покрытие, приведет к дополнительному разрастанию поверхности минеральных материалов, не покрытой слоем битума [14]. Образование микротрещин, трещин, а затем и выбоин неизбежно.

Применение полимерно-битумных вяжущих (ПБВ) относится к одной из наиболее активно внедряющихся технологий строительства и ремонта покрытий автомобильных дорог. Целью введения полимеров в битумы является повышение их деформативности при низкой температуре, теплоустойчивости и эластичности. Улучшение эксплуатационных свойств битумов может быть достигнуто в том случае, если полимер растворяется или набухает в дисперсионной среде битума, образуя пространственную структурную сетку [2, 4]. Полимерно-битумные вяжущие представляют собой композиционные материалы, структура и свойства которых зависят от вида и концентрации полимера, марки и структурного типа битума, технологии смешения компонентов. Варьируя видом и концентрацией полимера, можно получать ПБВ с заданным комплексом физико-механических свойств [3]. При этом полимербитумные вяжущие обладают низкой адгезией к минеральным материалам, входящим в состав асфальтобетона.

В процессе исследования физико-механических характеристик достаточно большого количества различных полимербитумных вяжущих, а также асфальтобетона на их основе нами было установлено, что на увеличение деформативной устойчивости образцов асфальтобетона максимальное влияние оказывают такие показатели, как температура размягчения, температура хрупкости, а также адгезия вяжущего к каменному материалу. Физико-механические характеристики полимербитумных вяжущих различных составов и образцов асфальтобетона с их применением представлены в табл. 1, образцов мелкозернистого асфальтобетона типа Б I марки с их применением – в табл. 2.

Результаты, представленные в таблицах, наглядно демонстрируют изменение различных свойств полимербитумных вяжущих и физико-механических характеристик асфальтобетона. Все составы полимербитумного вяжущего были приготовлены с использованием битума БНД 60/90 (Московского НПЗ). Важно отметить, что полимерасфальтобетон, приготовленный с использованием ПБВ 6, удовлетворяет требованиям ГОСТ 9128–2013 по всем показателям.

Полимербитумное вяжущее 1 обладает высокой пенетрацией, растяжимостью и низкой температурой хрупкости. При этом температура размягчения и сцепление с каменным материалом ПБВ 1 имеют невысокие значения. Образцы асфальтобетона с использованием данного ПБВ характеризуются высоким водонасыщением, низкой сдвигостойчивостью и пределом прочности при сжатии при 20 и 50 °С. При этом коэффициент внутреннего трения, водонасыщение и водостойкость при длительном водонасыщении не удовлетворяют требованию ГОСТ 9128–2013. Важно отметить, что ПБВ 1 обладает

Т а б л и ц а 1. Физико-механические характеристики полимербитумных вяжущих различных составов и образцов асфальтобетона с их применением

Показатель	Требования ГОСТ Р 52056–2003 (ПБВ 60)	Номер состава ПБВ					
		1	2	3	4	5	6
Глубина проникания иглы, 0,1 мм при температуре:							
25 °C	60	96	8	25	118	63	40
0 °C	32	59	5	16	68	33	17
Растяжимость, см, при температуре:							
25 °C	25	68	3	10	85	91	15
0 °C	11	38	—	2	40	11	3
Температура размягчения по кольцу и шару, °C	54	46	88	57	54	56	59
Температура хрупкости, °C	-20	-20	-13	-19	-26	-19	-28
Эластичность, %, при температуре:							
25 °C	80	62	—	88	—	45	38
0 °C	70	59	—	74	—	29	20
Сцепление с каменным материалом по ГОСТ 12801–98, баллы	—	3	3	3	4	5	5

эластичностью, однако ее значения при различных температурах не соответствуют нормативным требованиям.

Полимербитумное вяжущее 2 имеет высокую температуру размягчения (88 °C), что отразилось на сдвигостойчивости образцов асфальтобетона (показатели имеют максимальные значения). Однако недостаточное сцепление вяжущего с поверхностью каменного материала (3 балла), а также высокая температура хрупкости (-13 °C) привели к высокому водонасыщению, низкой водостойкости и трещиностойкости образцов композита, которые не соответствуют требованию ГОСТ 9128–2013.

Т а б л и ц а 2. Физико-механические характеристики образцов асфальтобетона типа Б I марки на основе полимербитумных вяжущих различных составов

Показатель	Требования ГОСТ 9128–2013 (ПДКЗ)	Номер состава ПБВ					
		1	2	3	4	5	6
Водонасыщение, %	1,0–2,5	4,5	4,5	4,0	4,0	3,5	2,5
Прочность при сжатии, МПа:							
при +50 °C	Не менее 1,1	1,35	1,80	1,60	1,30	1,70	1,70
при + 20 °C	Не менее 2,0	3,09	3,20	3,20	2,89	3,80	4,30
водонасыщенного образца при длительном водонасыщении	—	2,56	2,48	2,53	2,60	3,34	4,10
Сдвигостойчивость:							
коэффициент внутреннего трения	Не менее 0,81	0,78	0,95	0,85	0,80	0,90	0,95
сцепление при сдвиге при +50 °C, МПа	Не менее 0,30	0,33	0,63	0,58	0,35	0,59	0,60
Трещиностойкость	2,8–6,0	3,0	2,5	3,1	3,8	3,3	4,3
Водостойкость при длительном водонасыщении	Не менее 0,85	0,83	0,76	0,79	0,88	0,90	0,95

Полимербитумное вяжущее 3 обладает максимальной эластичностью из всех представленных вяжущих. Кроме того, вяжущее характеризуется высокой температурой размягчения (57°C) и низкой адгезией к минеральному материалу (3 балла). Образцы асфальтобетона, полученные с использованием этого вяжущего, обладают более высокой сдвигостойчивостью, трещиностойкостью и прочностными показателями по сравнению с составами, приготовленными на основе ПБВ 1. Однако из-за невысокой адгезии битума с каменным материалом показатель водостойкости образцов асфальтобетона при длительном водонасыщении составил 0,79, что ниже нормативного значения по ГОСТ 9128–2013 (менее 0,85). Кроме того, значение водонасыщения составило 4 %, что также выше требований ГОСТ 9128–2013.

Полимербитумное вяжущее 4 по своим свойствам аналогично ПБВ 1. Отличие заключается в более низкой температуре хрупкости (26°C), отсутствии эластичности и более высоком сцеплении с каменным материалом (4 балла), что положительно отразилось на увеличении водостойкости и трещиностойкости образцов асфальтобетона. Композит, приготовленный с использованием данного состава ПБВ, также обладает высоким водонасыщением. Более низкая по сравнению с составом 3 температура размягчения привела к получению образцов асфальтобетона с коэффициентом внутреннего трения менее 0,81, т.е. не удовлетворяющих требованиям ГОСТ 9128–2013 по данному показателю.

Полимербитумное вяжущее 5, так же как и ПБВ 1 и 4, имеет высокую глубину проникания иглы и растяжимость. При этом эластичность ПБВ 5 немного ниже, чем ПБВ 1. Однако исследования физико-механических характеристик асфальтобетона на основе ПБВ 5 показали, что органоминеральный композит обладает высокой сдвигостойчивостью, трещиностойкостью, водостойкостью. Скорее всего это связано с адгезией вяжущего, значение которой для ПБВ 5 составило 5 баллов, а ПБВ 1 – 3 балла. Асфальтобетон, приготовленный на основе ПБВ 5, имеет высокие физико-механические показатели и удовлетворяет всем требованиям ГОСТ 9128–2013 кроме водонасыщения.

Образцы асфальтобетона на основе ПБВ 6 обладают самыми высокими физико-механическими характеристиками, соответствующими всем нормативным значениям в соответствии с ГОСТ 9128–2013. Важно отметить, что эластичность вяжущего незначительна (38 и 20 % при температурах 25 и 0°C соответственно). Однако ПБВ 6 имеет высокую температуру размягчения, низкую температуру хрупкости и хорошее сцепление с каменным материалом (5 баллов).

К наиболее важным эксплуатационным характеристикам асфальтобетонных покрытий относятся предел прочности при сжатии при различных температурах, водостойкость, водонасыщение и деформативная устойчивость. Последний показатель оценивается по сдвигостойчивости, трещиностойкости и пределу прочности при сжатии при температуре 50°C асфальтобетонных образцов. Представленные результаты свидетельствуют о том, что данные показатели в большей степени зависят от таких свойств органического вяжущего, как температура размягчения, хрупкость и сцепление с каменным материалом. Однако нормативные значения этих показателей

по ГОСТ Р 52056 для полимербитумных вяжущих, использующихся в дорожном строительстве, не позволяют получить асфальтобетонное покрытие с высокими физико-механическими характеристиками, устойчивое к различным пластическим деформациям.

Исходя из вышеизложенного, для дорожного строительства необходимо разработать органический вяжущий материал, обладающий температурой хрупкости не более -26°C , температурой размягчения не менее 59°C и сцеплением с каменным материалом, равным 5 баллам (не менее 95 % поверхности минерального материала остается покрытым битумом после кипячения). Высокая температура размягчения органического вяжущего будет способствовать получению асфальтобетона с пределом прочности при сжатии при 50°C не менее 1,7 МПа, коэффициентом внутреннего трения около 0,95 и сцеплением при сдвиге, равным 0,6 МПа. Низкая температура хрупкости разработанного полимербитумного вяжущего (-26°C) приведет к получению композита на его основе с трещиностойкостью не менее 3,8 МПа. При этом высокая адгезионная способность вяжущего даст возможность повысить водостойкость образцов полимерасфальтобетона при длительном водонасыщении до значения, равного 0,95.

Таким образом, предъявление более высоких требований к современным органическим вяжущим, использующимся для дорожного строительства, по таким показателям, как температура размягчения, хрупкости и сцепление с каменным материалом, будет способствовать получению асфальтобетонного покрытия, устойчивого к различным видам пластических деформаций при высоких температурах и предотвращению появления трещин в покрытии при низких температурах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Д о ш л о в О.И., С п е ш и л о в Е.Г. Полимерно-битумное вяжущее – высокотехнологичная основа для асфальта нового поколения // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2013. № 6. С. 140–144.
2. Г о х м а н Л.М. Битумы, полимерно-битумные вяжущие, асфальтобетон, полимер-асфальтобетон. М., 2008. 81 с.
3. Т р а у т в а и н А.И., Г р и д ч и н А.М., В е р б к и н В.И. Разработка комплексного полимерного вяжущего для органоминеральных смесей, позволяющего снизить образование колеи на асфальтобетонном покрытии // Наукоемкие технологии и инновации / Белгород. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова. Белгород, 2014. С. 112–116.
4. Р у д е н с к и й А.В., К а л г и н Ю.И. Дорожные асфальтобетонные покрытия на модифицированных битумах: Учеб. пособие. Воронеж: ВГАСУ, 2009. 143 с.
5. П о д о ль с к и й В.П., Л о н г Н.В., Ш и Н.Д. Исследование температурного режима асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог во Вьетнаме // Научный журнал строительства и архитектуры. 2012. № 4. С. 78–84.
6. Я ды ки н а В.В., Г р и д ч и н А.М., Т р а у т в а и н А.И., В е р б к и н В.И. Исследование влияния различных полимеров и пластификаторов на свойства битума БНД 60/90 и асфальтобетона на его основе // Вестн. БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 6. С. 40–45.
7. Tang N., Sun C.J., Huang S.X., Wu S.P. Damage and corrosion of conductive asphalt Concrete subjected to freeze-thaw cycles and salt // Materials Research Innovations. 2013. Vol. 17, Iss. Suppl. 1. P. 240–245.

8. Wang Bing Ru, Hu Yong Ju, Qiu Xin. SWCC based prediction model of equilibrium moisture of clay subgrade with high groundwater table // Key Engineering Materials. 2013. Vol. 579–580. P. 906–910.
9. Якобсон М.Я., Кузнецова А.А., Введенская А.С. Актуальность и перспективы применения цементобетона в дорожном строительстве // Транспортное строительство. 2016. № 9. С. 7–10.
10. Яниковский Л.В. Альтернативы автомобильным дорогам с цементобетонными покрытиями в России нет // Наука и техника в дорожной отрасли. 2013. № 2. С. 18–20.
11. Яниковский Л.В. Анализ и перспективы строительства цементобетонных автомобильных дорог в России // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Прикладная экология. Урбанистика. 2012. № 2. С. 82–93.
12. Izmaylova D.K., Seliverstov N.D. Economic indicators of road surfaces reconstructions in the world using non-waste technology // International Journal of Advanced Studies. 2016. T. 6, No. 3. P. 51–62.
13. Yadykina V., Gridchin A., Trautvain A. Research of the interaction of mechanically activated fillers based on silica and cement paste // Key Engineering Materials. 2016. Vol. 722. P. 121–125.
14. Траутвайн А.И., Ядькина В.В., Землякова Д.В. Влияние адгезионных добавок на термостабильность битума // Дороги и мосты. 2014. № 1. С. 225–240.

Траутвайн Анна Ивановна, канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Яковлев Евгений Александрович, канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Силко Анастасия Александровна, асп.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

Получено после доработки 23.08.17

Trautvain Anna Ivanovna, PhD, Ass. Professor

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia

Yakovlev Evgeniy Aleksandrovich, PhD, Ass. Professor

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia

Silko Anastasiya Aleksandrovna, Post-graduate Student

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia

THE INTERRELATION OF THE DEFORMATIONAL STABILITY OF ASPHALT CONCRETE COATINGS AND THE MAIN PROPERTIES OF ORGANIC BINDING MATERIALS

The paper presents an analysis of various physical and mechanical characteristics of bitumen for the production of asphalt mixtures, which must be determined when controlling the quality of the organic binder in accordance with the requirements of the new regulatory documents. The results of experimental studies of the main characteristics of various polymer-bitumen binders and asphalt-concrete mixtures on their basis are presented. It is shown that the most important performance characteristics of asphalt-concrete coatings, such as water resistance, water saturation and deformative stability, depend on such properties of the organic binder as the softening and brittle temperature, and also the adhesion to the stone material. It is concluded that for road construction it is necessary to develop an organic binder material that has a low temperature of brittleness, as well as a high softening temperature and adhesion to stone materials. At the same time, an assessment of the quality of organic binders should be carried out on the same parameters.

K e y w o r d s: polymer-bitumen binder, asphaltic concrete, deformation stability, regulatory requirements, softening temperature, brittleness temperature, adhesion.

REFERENCES

1. D o s h l o v O.I., S p e s h i l o v Ye.G. Polimerno-bitumnoe vyazhushchee – vysokotekhnologichnaya osnova dlya asfal'ta novogo pokoleniya [Polymeric-bitumen binder – a high-tech basis for asphalt of a new generation]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of the Irkutsk State Technical University]. 2013. No. 6. Pp. 140–144. (in Russian)
2. G o k h m a n L.M. Bitumy, polimerno-bitumnye vyazhushchie, asfal'tobeton, polimerasfal'tobeton [Bitumen, polymer-bitumen binders, asphalt concrete, polymer-concrete]. Moscow, 2008. 81 p. (in Russian)
3. T r a u t v a i n A.I., G r i d c h i n A.M., V e r b k i n V.I. Razrabotka kompleksnogo polimernogo vyazhushchego dlya organomineral'nykh smesey, pozvolyayushchego snizit' obrazovanie kolei na asfal'tobetonnom pokrytiyu [Development of a complex polymer binder for organomineral mixtures, which allows to reduce the formation of the track on the asphalt-concrete coating]. *Naukoemkie tekhnologii i innovatsii / Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskiy universitet im. V.G. Shukhova* [High technology and innovation Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov]. 2014. Pp. 112–116. (in Russian)
4. R u d e n s k i y A.V., K a l g i n Yu.I. Dorozhnye asfal'tobetonnye pokrytiya na modifitsirovannykh bitumakh: ucheb. posobie [Road asphalt-concrete coatings on modified bitumens: Proc. allowance]. Voronezh, VGASU, 2009. 143 p. (in Russian)
5. P o d o l ' s k i y V.P., L o n g N.V., S h i N.D. Issledovanie temperaturnogo rezhima asfal'tobetonnykh pokrytiy avtomobil'nykh dorog vo V'etname [Investigation of the Temperature Regime of Asphalt Concrete Coatings of Highways in Vietnam]. *Nauchnyy zhurnal stroitel'stva i arkitektury* [Scientific Journal of Construction and Architecture]. 2012. No. 4. Pp. 78–84. (in Russian)
6. Y a d y k i n a V.V., G r i d c h i n A.M., T r a u t v a i n A.I., V e r b k i n V.I. Issledovanie vliyaniya razlichnykh polimerov i plastifikatorov na svoystva bituma BND 60/90 i asfal'tobetona na ego osnove [Investigation of the influence of various polymers and plasticizers on the properties of bitumen BND 60/90 and asphalt concrete on its basis]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]. 2015. No. 6. Pp. 40–45. (in Russian)
7. T a n g N., S u n C.J., H u a n g S.X., W u S.P. Damage and corrosion of conductive asphalt concrete subjected to freeze-thaw cycles and salt. *Materials Research Innovations*. 2013. Vol. 17, Iss. Suppl. 1. Pp. 240–245.
8. W a n g B i n g R u, H u Y o n g J u, Q i u X i n. SWCC based prediction model of equilibrium moisture of clay subgrade with high groundwater table. *Key Engineering Materials*. 2013. Vol. 579–580. Pp. 906–910.
9. Y a k o b s o n M.Ya., K u z n e t s o v a A.A., V v e d e n s k a y a A.S. Aktual'nost' i perspektivy primeneniya tsementobetona v dorozhnom stroitel'stve [Actuality and prospects of cement concrete application in road construction]. *Transportnoe stroitel'stvo* [Transport construction]. 2016. No. 9. Pp. 7–10. (in Russian)
10. Y a n k o v s k i y L.V. Al'ternativy avtomobil'nym dorogam s tsementobetonnymi pokrytiyami v Rossii net [There are no alternatives to roads with cement-concrete coatings in Russia]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrassli* [Science and technology in the road sector]. 2013. No. 2. Pp. 18–20. (in Russian)
11. Y a n k o v s k i y L.V. Analiz i perspektivy stroitel'stva tsementobetonnykh avtomobil'nykh dorog v Rossii [Analysis and prospects of cement-concrete road construction in Russia]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo*

- politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Applied ecology. Urbanistics]. 2012. No. 2. Pp. 82–93. (in Russian)
12. Izmaylova D.K., Seliverstov N.D. Economic indicators of road surfaces reconstructions in the world using non-waste technology. International Journal of Advanced Studies. 2016. T. 6, No. 3. Pp. 51–62.
13. Yadykina V., Gridchin A., Trautvain A. Research of the interaction of mechanically activated fillers based on silica and cement paste. Key Engineering Materials. 2016. Vol. 722. Pp. 121–125.
14. Trautvain A.I., Yadykina V.V., Zemlyakova D.V. Vliyanie adgezionnykh dobavok na termostabil'nost' bituma [Influence of adhesion additives on the thermal stability of bitumen]. Dorogi i mosty [Roads and bridges]. 2014. No. 1. Pp. 225–240. (in Russian)
-

ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ НАСЕЛЕННЫХ МЕСТ, ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА



УДК 628.337

О.Г. ГИРИКОВ

К ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УСРЕДНИТЕЛЬ–РЕАКТОР В СХЕМАХ ОЧИСТКИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

Поскольку сооружения для очистки производственных сточных вод работают в условиях сильной нестационарности их состава, в схемах их физико-химической очистки обычно первыми звенями технологической цепочки после решеток являются усреднители, от эффективности работы которых во многом зависят качество и стабильность очистки сточных вод на всех последующих очистных сооружениях. Целью данного исследования является учет и максимальное использование усредняющей способности зоны смешения реактора, что может позволить дать существенный экономический, технологический или экологический эффект. Поэтому не вызывает сомнения важность и актуальность работы в данном направлении. Наиболее часто применяются усреднители состава сточных вод барботажного типа, которые имеют преимущества перед другими конструкциями. Однако и реакторы, состоящие из зон смешения и вытеснения, также обладают определенной усредняющей способностью. Поэтому предлагается учесть усредняющую способность зоны смешения реактора и оптимизировать его работу с усреднителем состава сточных вод. Для очистки сточных вод от консервативных субстанций, например, ионов тяжелых металлов, которые в результате реакций меняют свою форму, но не изменяют концентрацию, ранее предложена новая схема работы усреднителя с реактором, которая эффективнее существующей двухступенчатой, особенно при усреднении «пиковых» колебаний состава на входе. Она представляет собой двухступенчатый усреднитель с байпасированием части поступающих сточных вод, минуя усреднитель, в реактор. Путем сравнения кривых отклика новой схемы работы усреднителя с реактором на импульсное возмущение концентрации на входе показано ее преимущество перед существующей при разном соотношении объемов усреднителя и зоны смешения реактора. Также установлено, что оптимальное соотношение объема усреднителя и зоны смешения реактора составляет 1:1, т.е. целесообразно общий усредняющий объем поделить между ними поровну.

Ключевые слова: сточные воды, усреднители и реакторы, схемы их работы, оптимизация соотношений расходов и объемов.

© Гириков О.Г., 2017

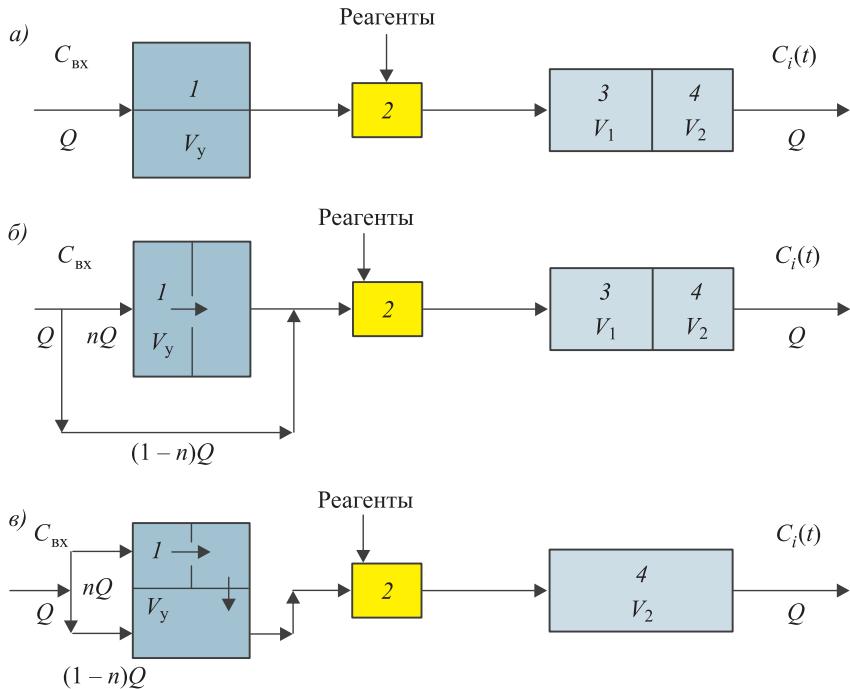


Рис. 1. Схемы работы усреднителя с реактором

a – существующая; *б* – предлагаемая; *в* – при отсутствии зоны смешения в реакторе

1 – усреднитель состава сточных вод барботажного типа; 2 – смеситель;

3 – зона смешения реактора; 4 – зона вытеснения реактора

В схемах физико-химической и биологической очистки производственных сточных вод или их смеси с хозяйственно-бытовыми широко применяются в качестве первых сооружений усреднители и реакторы (камеры реакции и нейтрализации, аэротенки, окситенки, нитрификаторы, денитрификаторы, биосорбера и т.д.). Учитывая сильные колебания состава, особенно производственных сточных вод, понятно, что от работы усреднителей во многом зависит эффективность и стабильность работы всех последующих сооружений в схемах очистки. Однако следует отметить, что, кроме усреднителей, реакторы, состоящие из зон смешения и вытеснения, также обладают определенной усредняющей способностью, что не учитывается при проектировании и расчете усреднителей состава сточных вод, а также нормативной¹ и справочной литературой [1, 2]. Вместе с тем учет и максимальное использование усредняющей способности реактора может позволить сократить объем усреднителя при проектировании сооружений для очистки производственных сточных вод либо повысить технологический эффект очистки при реконструкции действующих очистных сооружений. Поэтому не вызывает сомнения важность и актуальность работы в данном направлении, чему и посвящена предлагаемая статья.

Рассмотрим существующую схему работы усреднителя с реактором, которая представлена на рис. 1, *a*. Как видно из рис. 1, *a*, поступающие сточные воды последовательно проходят усреднитель, затем смеситель, где

¹ СНиП 2.04.03–85. Канализация. Наружные сети и сооружения. М.: ОАО «ЦПП», 2007. 87 с.

смешиваются с реагентами и направляются в реакторы для завершения реакции взаимодействия загрязнений с реагентами. В качестве усреднителей состава сточных вод преимущественно используются усреднители с перемешиванием стоков в них воздухом, т.е. барботажного типа, которые имеют ряд преимуществ перед другими конструкциями [1–6]. Как показали исследования работы производственных усреднителей барботажного типа, процесс усреднения в них с достаточной для практики точностью описывается моделью идеального смешения [1, 3, 4].

Рассмотрим эффективность усреднения существующей схемы работы усреднителя с реактором на примере усреднения загрязнений, представляющих собой консервативную субстанцию, т.е. вещества, которые не изменяют свою концентрацию в результате реакций в реакторе. К таким консервативным загрязнениям относятся, например, тяжелые металлы, которые, не изменяя своей концентрации, могут переходить из одной формы в другую. Так, при очистке хромсодержащих сточных вод гальванических цехов в реакторе хром(VI) восстанавливается в хром(III), но при этом содержание хрома в очищаемой сточной воде в результате реакции остается прежним. При нейтрализации кислых или кисло-щелочных сточных вод гальванических или травильных цехов и отделений ионы металлов (железа, меди, цинка, никеля, алюминия, кадмия и т.д.) образуют их гидроксиды, однако концентрации этих металлов в камерах нейтрализации при этом не изменяются.

Для оценки эффективности усреднения существующей схемы работы усреднителя состава с реактором воспользуемся методами кибернетики, которые широко применяются в химической технологии и в теории химических реакторов. По реакции системы на стандартные возмущения концентрации на входе (импульсное, ступенчатое, синусоидальное) судят о ее динамических характеристиках [7]. Подобные методы находят применение и при оценке эффективности усредняющих систем. Так, в работе [8] на примере сравнения одно- и двухступенчатой схем усреднения проведен анализ их эффективности при импульсном, ступенчатом, гармоническом и рандомизированном изменениях концентрации консервативной субстанции на входе.

Наиболее неблагоприятными изменениями состава поступающих сточных вод являются резкие «пиковые» колебания, при которых на короткий промежуток времени концентрация загрязнения повышается в десятки и сотни раз и после прохождения этого «пика» быстро снижается до значений, близких к средним. Такие колебания состава наблюдаются периодически при совместном водоотведении промывных сточных вод и отработанных гальванических и травильных растворов. Например, при сливе отработанных гальванических и травильных ванн, а также при аварийных сливах, за период опорожнения соответствующей ванны концентрации основного загрязнения (меди, никеля, хрома, железа и т.д.) увеличиваются в десятки и сотни раз превышающие его среднее содержание в промывной воде. Это же происходит и при сливе отработанных растворов барабанов золения, обеззоливания–мягчения, дубления и др. при выделке кож на кожевенных предприятиях и т.д.

Однако такие «пиковые» колебания состава являются наиболее неблагоприятными и на их усреднение и дальнейшую очистку должны быть прежде

всего рассчитаны усреднители и все последующие сооружения схемы очистки. Из структурной схемы, пользуясь правилом сочетания элементарных звеньев, получаем передаточную функцию такой двухступенчатой схемы (см. рис. 1, а) при условии идеального перемешивания в усреднителе и в зоне смешения реактора (объемом смесителя, учитывая незначительное время пребывания сточной воды в нем, можно пренебречь):

$$W(p) = \frac{C_{i(p)}}{C_{\text{вх}(p)}} = \frac{e^{-pV_2/Q}}{(1+pV_y/Q)(1+pV_1/Q)}, \quad (1)$$

где $C_{i(p)}$ и $C_{\text{вх}(p)}$ – выходная и входная временные функции, преобразованные по Лапласу;

p – комплексная переменная;

V_y , V_1 и V_2 – объемы соответственно усреднителя, зоны смешения и вытеснения реактора;

Q – расход сточных вод.

Наиболее близкой к «пиковому» по характеру колебания является импульсная функция Дирака, принимающая бесконечно большое значение в бесконечно малый промежуток времени t и равная нулю при всех остальных значениях t . Подставив в (1) импульсную входную функцию, которая имеет соответствующее ей изображение, равное единице, получим уравнение, из него после обратного преобразования Лапласа находим формулу для расчета $C_1(t)$ -кривой на выходе системы

$$C_1(t) = Q(e^{-Q(t-T_2)/V_y} - e^{-Q(t-T_2)/V_1})/(V_y - V_1), \quad (2)$$

здесь T_2 – среднее время пребывания стоков в зоне вытеснения реактора, равное $T_2 = V_2/Q$.

Нетрудно показать, что при всех значениях $t \leq T_2$ функция $C_1(t) = 0$, а при $t > T_2$ вычисляется по уравнению (2). В частном случае, когда $V_y = V_1 = V_o/2$ (здесь $V_o = V_y + V_1$, т.е. суммарный объем усреднителя и зоны смешения реактора), передаточная функция для всей системы (см. рис. 1, а) имеет вид

$$W(p) = \frac{e^{-pV_2/Q}}{(1+pV_y/Q)^2} = \frac{e^{-pV_2/Q}}{(1+pV_o/2Q)^2}, \quad (3)$$

а после обратного преобразования Лапласа данного уравнения получаем формулу для расчета $C_2(t)$ -кривой

$$C_2(t) = \left(\frac{2Q}{V_o} \right)^2 (t - T_2) e^{-2Q(t-T_2)/V_o}. \quad (4)$$

Если обозначить $V_y = mV_o$, $V_1 = (1-m)V_o$ (здесь m – доля общего усредняющего объема данной системы, приходящаяся на усреднитель), тогда уравнение (2) для расчета $C_1(t)$ -кривой примет следующий вид

$$C_3(t) = Q(e^{-Q(t-T_2)/mV_o} - e^{-Q(t-T_2)/(1-m)V_o})/[(2m-1)V_o]. \quad (5)$$

Кривая отклика такой системы на импульсное возмущение концентрации на входе для $m = 0,75$, рассчитанная по формуле (5), представлена на рис. 2. Откуда видно, что сначала концентрация на выходе системы равна

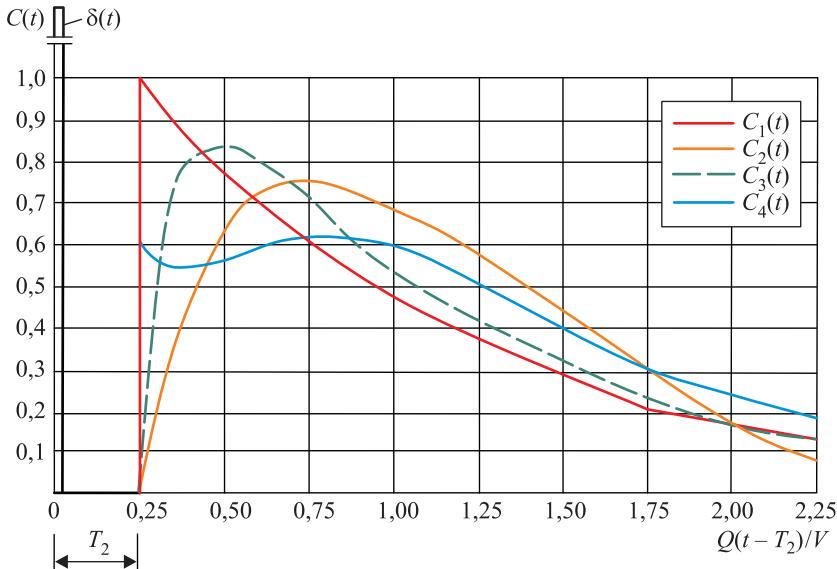


Рис. 2. Кривые отклика различных схем работы усреднителя с реактором на импульсное возмущение концентрации на входе

нулю в течение времени нахождения сточной воды в зоне вытеснения реактора ($T_2 = V_2/Q$), затем постепенно возрастает, достигает максимума, после чего плавно снижается. Такая же $C_3(t)$ -кривая для $m = 0,25$ полностью совпадает с аналогичной кривой для $m = 0,75$. Для случая, когда $m = 0,5$, а $V_y = V_1$ соответствующая $C_4(t)$ -кривая, рассчитанная по (4), также представлена на рис. 2. Любое отклонение значений m от 0,5 приводит к ухудшению степени усреднения данной системы, причем чем больше величина этого отклонения, тем хуже эффект усреднения, так как максимальное значение соответствующей $C_i(t)$ -кривой будет больше, чем при $m = 0,5$, а при $m \rightarrow 1$ или $m \rightarrow 0$ характер $C(t)$ -кривой приближается или практически совпадает с соответствующей кривой одноступенчатой схемы $C_1(t)$. Таким образом, при различном соотношении усредняющих объемов самого усреднителя и части реактора, участвующей в смешении сточных вод, усредняющая способность данной системы будет занимать промежуточное положение между одно- и двухступенчатым усреднением. В лучшем случае она будет равна двухступенчатому усреднению при $m = 0,5$.

Однако в статье [9] предложена более эффективная схема работы усреднителя с реактором, которая представляет собой двухступенчатый усреднитель барботажного типа с байпасированием части расхода поступающих сточных вод в смеситель, т.е. сразу в зону смешения реактора (см. рис. 1, б), и показано ее преимущество при усреднении «пиковых» колебаний состава поступающих сточных вод. Также из структурной схемы, пользуясь правилом сочетания элементарных звеньев, получаем передаточную функцию для предлагаемой схемы

$$W_{(p)} = \frac{C_{i(p)}}{C_{\text{вх}(p)}} = \frac{(1-n)e^{-pV_3/Q}}{1 + (pmV_o/Q)} + \frac{ne^{-pV_3/Q}}{[1 + (pmV_o/Q)][1 + p(1-m)V_o/2nQ]^2}, \quad (6)$$

здесь n – доля общего расхода Q , направляемая в усреднитель.

После подстановки в качестве входного параметра импульсной функции, которая в пространстве изображений равна 1, и обратного преобразованию Лапласа данного уравнения, получаем формулу для расчета $C_4(t)$ -кривой

$$C_4(t) = \frac{(1-n)Qe^{-Q(t-T_3)/[(1-m)V_o]}}{(1-m)V_o} + \frac{n(1-m)V_o e^{-Q(t-T_3)/[(1-m)V_o]}}{Q[(1-m)(V_o/Q) - mV_o/(2nQ)]^2} - \frac{n\{m(1-m)V_o/(2nQ^2) + [(1-m)(V_o/Q) - mV_o/(2nQ)]t\}e^{-2nQ(t-T_3)/mV_o}}{mV_o/(2nQ)[(1-m)V_o/Q - mV_o/(2nQ)]^2}. \quad (7)$$

Покажем преимущество предлагаемой схемы работы двухступенчатого усреднителя с байпасированием части поступающей сточной воды в реактор (см. рис. 1, б) при усреднении «пиковых» колебаний концентрации на входе. Для этого построим $C_4(t)$ -кривую отклика такой схемы на импульсное возмущение на входе, построенную по уравнению (7) для $m = 0,5$ и представленную на рис. 2. Откуда видно, что максимальное значение $C_4(t)$ -кривой наступает сразу после прохождения потока через зону вытеснения реактора и вторая часть «пиковой» концентрации на выходе наблюдается позже, и по абсолютной величине равняется первой части при оптимальном для данного случая $n = 0,69$. Однако по абсолютной величине эти максимальные значения $C_4(t)$ значительно меньше аналогичной величины для существующей двухступенчатой схемы для $m = 0,5$ ($C_2(t)$ -кривая) и тем более для $m = 0,75$ и $m = 0,25$ ($C_4(t)$ -кривая), поскольку их кривые совпадают. Найдем оптимальное значение m для предлагаемой схемы работы двухступенчатого усреднителя с реактором.

На рис. 3 также представлены кривые отклика новой схемы на импульсное возмущение концентрации на входе, рассчитанные по (7) для $m = 0,5$ ($C_4(t)$ -кривая) для сравнения с аналогичными кривыми при $m = 0,875$ ($C_5(t)$ -кривая с оптимальным $n = 0,908$) и $0,125$ ($C_6(t)$ -кривая с оптимальным

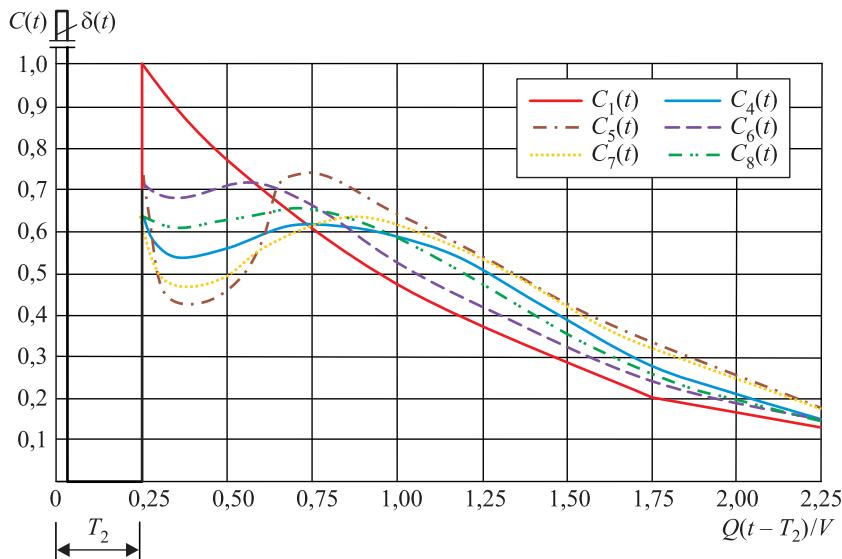


Рис. 3. Кривые отклика новой схемы работы усреднителя с реактором на импульсное возмущение концентрации на входе

$n = 0,385$). Откуда видно, что любое изменение m по сравнению с 0,5 приводит к возрастанию максимальной концентрации на выходе, т.е. к ухудшению эффекта усреднения. Для дополнительного подтверждения этого утверждения на рис. 3 представлены соответствующие кривые $C_7(t)$ для $m = 0,75$ (с оптимальным $n = 0,84$) и $C_8(t)$ для $m = 0,25$ ($n = 0,515$). Как следует из рис. 3, чем больше отклонение m от 0,5, тем хуже эффект усреднения даже при оптимальном для каждого случая n .

Поэтому при проектировании новых или реконструкции действующих очистных сооружений целесообразно перераспределение общего усредняющего объема поровну между усреднителем и зоной смешения реактора, что до сих пор не учитывалось в практике проектирования. При невозможности или нецелесообразности сохранения такого оптимального соотношения объемов усреднителя с зоной смешения реактора при реконструкции очистных сооружений рекомендуется также заменить существующую схему их работы (см. рис. 1, а) на предлагаемую (см. рис. 1, б), но при этом найти оптимальное значение n для этого случая. Для облегчения расчетов для предварительного задания оптимального n можно воспользоваться теоретическим графиком, приведенным на рис. 4, которое затем уточняется. Наличие на выходе такой усредняющей схемы двух максимальных концентраций, одинаковых по величине, свидетельствует об оптимальности нахождения n .

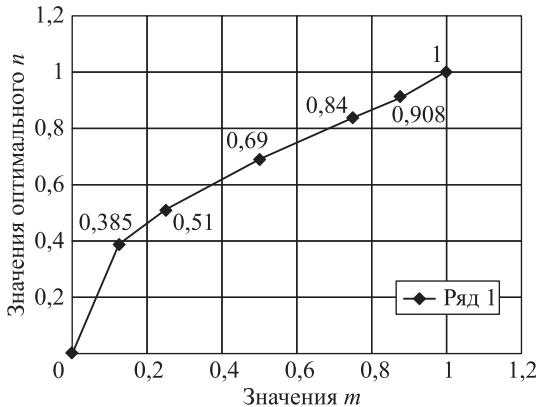


Рис. 4. Теоретическая зависимость n от m

на рис. 1, в, т.е. с использованием трехступенчатого усреднителя с байпасированием части поступающего потока в последнюю секцию.

При проектировании и расчете предлагаемой схемы работы усреднителя с реактором рекомендуется использовать методику расчета ВНИИ ВОДГЕО [1, 2, 4] и расчетную формулу для определения $C_{\text{вых}}$, вывод которой приведен в статье [10]:

$$C_{\text{вых}} = C_{\text{вх}} - (C_{\text{вх}} - C_o^p) e^{-Qt/V_1} - \frac{(V_y/2V_1)(C_{\text{вх}} - C_o^{\text{II}})(e^{-Qt/V_1} - e^{-2Qnt/V_y})}{1 - V_y/(2nV_1)} - \\ - \frac{(V_y/2V_1)(C_{\text{вх}} - C_o^{\text{I}})}{[1 - V_y/(2nV_1)]^2} \{ e^{-Qt/V_1} - e^{-2Qnt/V_y} [1 + (1 - V_y/(2nV_1))2Qnt/V_y] \}, \quad (8)$$

где $C_{\text{вх}}$ – концентрация загрязнения в сточной воде на входе в систему усреднитель–реактор за данный отрезок времени продолжительностью t ;

C_o^I , C_o^{II} и C_o^P – концентрация данного загрязнения в I, II секциях усреднителя и в зоне смешения реактора к началу данного отрезка времени t , т.е. перед поступлением сточных вод с концентрацией C_{bx} .

Целесообразность использования той или иной схемы работы усреднителя с реактором и оптимизация распределения соотношения поступающего потока и объемов между ними определяется расчетом в каждом конкретном случае. Если производственные сточные воды содержат загрязняющие вещества, которые в результате реакций изменяют свою концентрацию в реакторе, то данную систему необходимо рассчитывать и оптимизировать с учетом исходной и конечной концентраций загрязнений в сточной воде, поступающей в реактор и выходящей из него, порядка и кинетики реакции.

Выводы. 1. Предложено учесть и максимально использовать усредняющую способность комбинированного реактора, состоящего из зон смешения и вытеснения, за счет использования новой схемы работы усреднителя с ним, представляющей собой двухступенчатый усреднитель с байпасированием части поступающих стоков в реактор, и оптимального распределения общего усредняющего объема между ними. Это позволит дать определенный экономический, технологический или экологический эффект.

2. Как показал анализ кривых отклика данной схемы их работы при усреднении консервативных загрязнений на импульсное колебание концентрации на входе, общий усредняющий объем целесообразно разделить поровну между усреднителем и зоной смешения реактора при оптимальной доле входного потока, байпасирующего в реактор, минуя усреднитель, составляющей примерно 0,31.

3. При проектировании и реконструкции локальных очистных сооружений для очистки производственных сточных вод в каждом конкретном случае целесообразно определять их объемы и оптимальную долю байпасирующего потока ($n - 1$), используя уточненную методику расчета ВНИИ ВОДГЕО [1, 4], расчетную формулу (8), полученную ранее в [10], а также теоретическую зависимость оптимального значения n от m , графически представленную на рис. 4.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Усреднители промышленных сточных вод: Рекомендации по проектированию и эксплуатации / ВНИИ ВОДГЕО. М., 1968. 26 с.
2. Канализация населенных мест и промышленных предприятий: Справ. проектировщика / Под общ. ред. В.Н. Самохина. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1981. 639 с.
3. Тарнопольская М.Г. Исследование усреднения концентрации и расхода промышленных сточных вод: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1967. 20 с.
4. Тарнопольская М.Г. Основы расчета смесителей сточных вод // Очистка производственных сточных вод: Сб. № 4. М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1969. С. 11–23.
5. Чан Хиэу Ньюе. Усреднение расхода и концентрации сточных вод красильно-отделочных фабрик текстильной промышленности: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: МИСИ, 1972. 20 с.
6. Яковлев С.В., Караблин Я.В., Ласков Ю.М., Воронов Ю.В. Водоотводящие системы промышленных предприятий: Учеб. для вузов. М.: Стройиздат, 1990. 511 с.

7. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1971. 496 с.
8. Novotny Vl adimir, Jr. Englande A.J. Equalization design techniques for conservative substances in wastewater treatment systems // Water Research. 1974. Vol. 8. P. 325–332.
9. Гириков О.Г. Анализ схем работы усреднителя и реактора для очистки производственных сточных вод // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1986. № 11. С. 86–90.
10. Гириков О.Г., Коновалов Е.И. К расчету системы усреднитель–реактор в схемах очистки сточных вод // Изв. вузов. Строительство. 2003. № 8. С. 88–94.

Гириков Олег Георгиевич, канд. техн. наук, доц.; E-mail: og.gir@mail.ru
Новосибирский государственный архитектурно-строительный институт (Сибстрин)

Получено 12.07.17

Girikov Oleg Georgievich, PhD, Ass. Professor; E-mail: og.gir@mail.ru
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Russia

TO OPTIMIZE THE SYSTEM EQUALIZATION TANK–REACTORS IN THE SCHEME OF CLEARING OF INDUSTRIAL SEWAGE

Since the constructions for clearing of industrial sewage work in conditions of strong unsteadiness in their composition, so in the schemes of physical-chemical treatment is usually the first links in the processing chain after the grids are equalization tanks, the efficiency of which depends largely on the quality and stability of purification of waste water in all subsequent wastewater treatment plants. The aim of this study is to take into account maximum use of the averaging ability of the mixing zone of the reactor, which can provide significant economic, technological or environmental effect. So no doubt the importance and relevance of the work in this direction. The most commonly used equalization tank composition of sewage bubbling type, which have advantages over other designs. However, and reactors consisting of zones of mixing and displacement also have a certain averaging effect. It is therefore proposed to consider and use in the averaging ability of the zone of mixing reactors. For wastewater treatment from conservative substances, such as ions of heavy metals, which resulted from the reactions, change their form, but does not alter the concentration previously proposed a new scheme of equalization reactor, which is effectively the existing two-stage, particularly when equalization the “peak” of the vibrations of the structure at the entrance. It is a two-stage equalization tank with the bypass part of the incoming wastewater, bypassing the equalization tank, to the reactor. By comparing the response curves of the new scheme equalization reactor in the pulsed perturbation of the concentrations at the entrance, shows its advantage over existing in different proportions of volume equalization tank and mixing zone of the reactor. It is also established that the optimum ratio of the volume equalization tank and the mixing zone of the reactor is 1:1, that is, appropriate the total equalization volume divided equally between them.

К e y w o r d s: wastewater, equalization tank and reactors, schemes of work, optimization of the ratio of costs and volumes.

REFERENCES

1. Usredniteli promyshlennykh stochnykh vod: Rekomendatsii po proektirovaniyu i ekspluatatsii [Equalization basins for industrial wastewaters: Recommendations for design and operation]. Moscow, 1968. 26 p. (in Russian)

2. Kanalizatsiya naselennykh mest i promyshlennykh predpriatiy: Spravochnik proektirovshchika [Sanitation of settlements and industrial enterprises: Directory of designer]. Moscow, Stroyizdat, 1981. 639 p. (in Russian)
 3. Tarnopol'skaya M.G. Issledovanie usredneniya kontsentratsii i raskhoda promyshlennykh stochnykh vod: aftoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Equalization the concentration and flow of sewage of industrial enterprises: author. dis... PhD]. Moscow, 1967. 20 p. (in Russian)
 4. Tarnopol'skaya M.G. Osnovy rascheta smesiteley stochnykh vod [The basis of the calculation of faucets waste water]. Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod.: Sb. 4. [The industrial wastewater treatment. Collection]. Moscow, 1969. Pp.11–23. (in Russian)
 5. Chan Hiey Ny'e. Usrednenie raskhoda i kontsentratsii stochnykh vod krasil'no-otdelochnykh fabrik tekstil'noy promyshlennosti: avtoref. dis. ... cand. tekhn. nauk [Averaging the flow and concentration of wastewater of dyeing and finishing factories of the textile industry: author. dis. ... PhD]. Moscow, 1972. 20 p. (in Russian)
 6. Yakovlev S.V., Kareljin Ya.V., Laskov Yu.M., Voronov Yu.V. Vodootvodyashchie sistemy promyshlennykh predpriatiy [Sewage systems of industrial enterprises]. Moscow, Stroyizdat, 1990. 511 p. (in Russian)
 7. Kafarov V.V. Metody kibernetiki v khimii i khimicheskoy tekhnologii [Methods of cybernetics in chemistry and chemical engineering]. Moscow, 1971. 496 p. (in Russian)
 8. Novotny Vladimir, Jr. Englaude A.J. Equalization design techniques for conservative substances in wastewater treatment systems. Water Research. 1974. Vol. 8. Pp. 325–332.
 9. Girikov O.G. Analiz skhem raboty usrednitelya i reaktora dlya ochistki proizvodstvennykh stochnykh vod [Analysis of equalization and reactor basins operating schemes to purify industrial wastes]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura [News of Higher Educational Institutions. Construction and Architecture]. 1986. No. 11. Pp. 86–90. (in Russian)
 10. Girikov O.G., Konovalov E.I. K raschetu sistemy usrednitel'-reaktor v skhemakh ochistki stochnykh vod [Towards the design of equalizer-reactor in sewage purification schemes]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2003. No. 8. Pp. 88–94. (in Russian)
-

УДК 697.92 : 726.54

А.Г. КОЧЕВ, М.М. СОКОЛОВ, Е.А. КОЧЕВА, А.С. ЖАРНАКОВ

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРАВОСЛАВНЫХ ХРАМАХ

Рассматриваются различные аспекты применения энергосберегающих мероприятий в православных храмах, такие как энергоэффективные системы естественной вентиляции и возобновляемые источники энергии. В разделе архитектурный анализ обоснован выбор культового сооружения для проведения в нем энергосберегающих мероприятий. В разделе системы естественной вентиляции приводятся рекомендации по установке приточных и вытяжных фрамуг на конкретном примере. В разделе системы отопления в качестве источника рассматривается тепловой насос.

Ключевые слова: православные храмы, аэродинамика, микроклимат, тепловые насосы, возобновляемые источники энергии, аэрация.

Введение. Инженерные системы, существовавшие в православных храмах XVII–XX вв., практически полностью разрушились в связи с целенаправленным уничтожением или отсутствием квалифицированной эксплуатации. Поддержание требуемых параметров микроклимата должно также учитывать теплофизические аспекты, применяемые при восстановлении, реконструкции, новом строительстве и переводе летних православных храмов в круглогодичный режим эксплуатации (АВОК Стандарт–2–2004. Храмы православные; МДС 31–9. 2003. Православные храмы. Т. 2).

Проведение энергосберегающих мероприятий должно отвечать требованиям стратегической задачи, поставленной Президентом и Правительством России, которая заключается в рациональном использовании топливно-энергетических ресурсов. С этой целью в проектах могут найти применение новые энергосберегающие технологии и оборудование, использующее возобновляемые источники энергии.

Цель данного исследования – проанализировать возможность применения энергосберегающих мероприятий в храме, в том числе с использованием возобновляемых источников энергии.

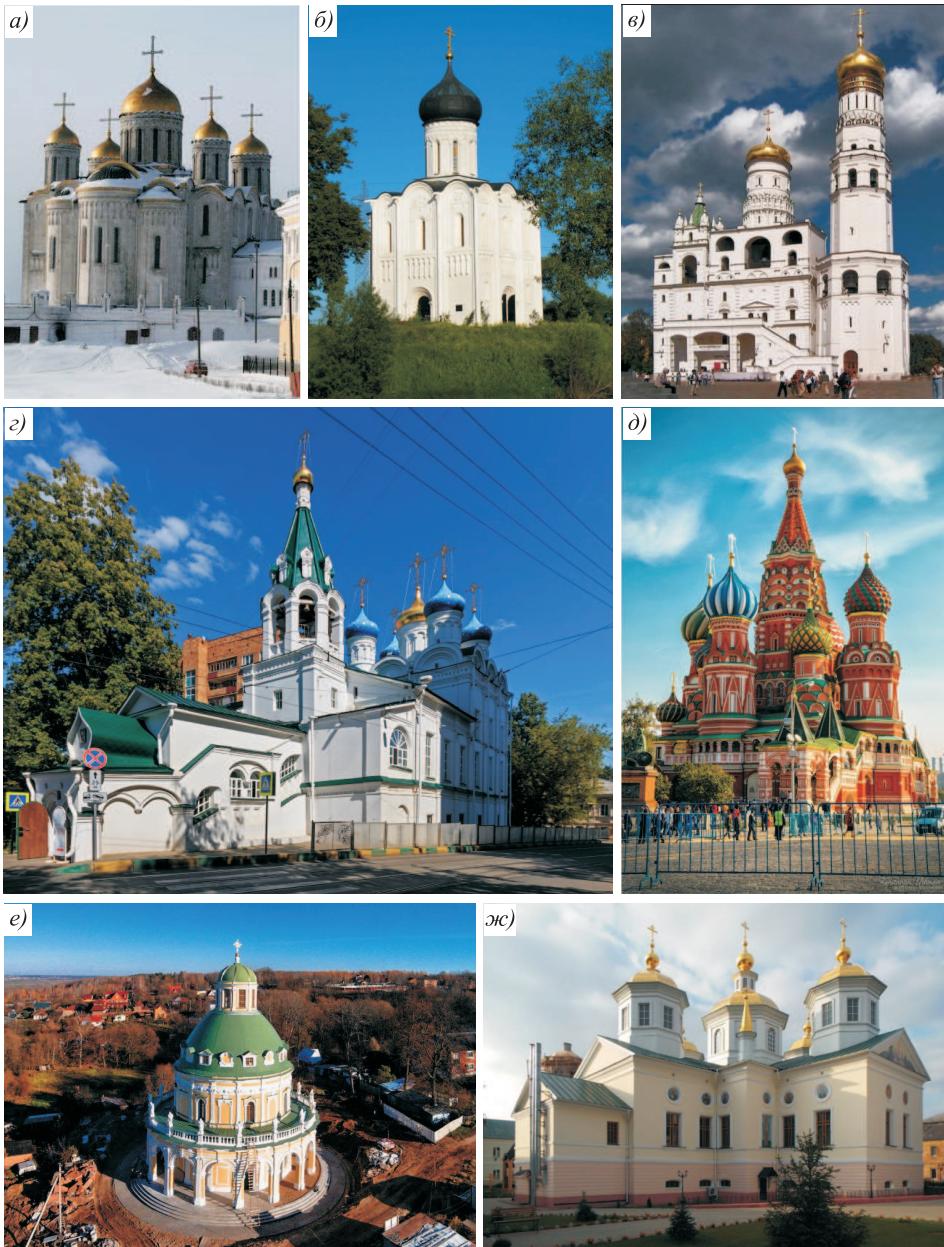
Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести архитектурный анализ с целью выбора культового сооружения для энергосберегающих мероприятий;
- в качестве систем вентиляции использовать системы аэрации для снижения затрат на потребляемую храмом электрическую энергию;
- в качестве источника системы теплоснабжения рассмотреть возобновляемый источник энергии – тепловой насос.

Архитектурный анализ. За более чем тысячелетнюю историю христианства на Руси православные храмы проделали огромный путь в плане эволюции архитектурных форм: от «простейших» клетских храмов до архитектурного ансамбля на о-ве Кипки и других ярких представителей русского православно-

го зодчества. Являясь богатейшим культурным наследием нашей родины, каждый храм из века в века сохраняет сакральный смысл каждого архитектурного элемента и церковной утвари. Архитектурный анализ культовых сооружений необходим для оценки возможности применения различных инженерных коммуникаций, поскольку каждый такой проект будет уникальным [1]. Анализ показал, что наиболее часто встречаются типы зданий храмов (рис. 1):

- крестово-купольный (Успенский собор, г. Владимир);
- центрально-купольный (церковь Покрова на Нерли, Владимирская обл.);



Rис. 1. Типы храмов

а – крестово-купольный, б – центрально-купольный; в – столпообразный; г – базиликальный; д – восьмиугольный; е – круглый; жс – крестообразный

- базиликальный (церковь Знамения Божией Матери св. Жен-Мироносиц, г. Нижний Новгород);
- столпообразный (храм-колокольня св. Иоанна Лествичника, г. Москва). В свою очередь, по форме плана храмы подразделяются:
 - на круглые (храм Рождества Пресвятой Богородицы, с. Подмоклово, Московская обл.);
 - восьмиугольные (храм Василия Блаженного, г. Москва);
 - крестовые (Крестовоздвиженский женский монастырь, г. Нижний Новгород).

Анализ архитектурных форм и стилей позволяет сделать определенные выводы по поводу выбора культового сооружения для энергосберегающих исследований.

Определяющее значение при выборе храма для проведения энергосберегающих мероприятий имеет возможность применения в нем систем естественной вентиляции. Системы естественной вентиляции будут работать с большей эффективностью, если расстояние между ярусом приточных систем (первый нижний ярус оконных проемов) и ярусом вытяжных систем (оконные проемы в барабане храма) будет максимальным [2–4]. Это возможно только в том случае, когда между молельным залом и барабаном (барабанами) отсутствует перегородка, и воздух свободно перемещается из молельного зала в барабан храма [5]. Такие системы могут быть реализованы в храмах любого типа: базилике, крестово-купольном, ярусном и т.д.

Еще одним вопросом является организация систем естественной вентиляции в других помещениях храма. При выборе сооружения в данном исследовании ограничимся храмом, который будет состоять только из трех помещений: прихода, молельного зала и алтаря. Поскольку наиболее высокой частью храма является молельный зал, над которым, как правило, возвышаются барабаны и купола, приход и алтарь не всегда могут быть вовлечены в общую систему естественной вентиляции. Алтарь отделен от храма иконостасом, а приход – дверями. Однако иконостас не всегда глухая стена, над ним могут быть установлены переточные решетки для перетекания воздуха из алтаря в молельный зал с последующим удалением его через барабан храма. Приток в алтарь, как и молельный зал, может осуществляться через фрамуги в нижнем ярусе оконных проемов. Также приход и молельный зал могут не иметь перегородок в виде дверей, а в случае их наличия могут быть также использованы переточные решетки, установленные над дверями.

Наиболее оптимальный, на наш взгляд, вариант – храм типа «корабль» (базилика) [6] из-за последовательного расположения всех вышеуказанных помещений. Также важным моментом является наличие достаточного места в техническом помещении храма для расположения инженерного оборудования.

На основании архитектурного анализа нами был выбран храм, который является оптимальным с точки зрения проведения в нем энергосберегающих мероприятий. Прототипом для исследуемого храма послужила церковь Державной Божьей Матери, расположенная в пос. Память Парижской Коммуны Борского района Нижегородской области (рис. 2).

Системы естественной вентиляции. Система аэрации представляет собой увязанную расчетом систему приточных и вытяжных фрамуг, расположенных

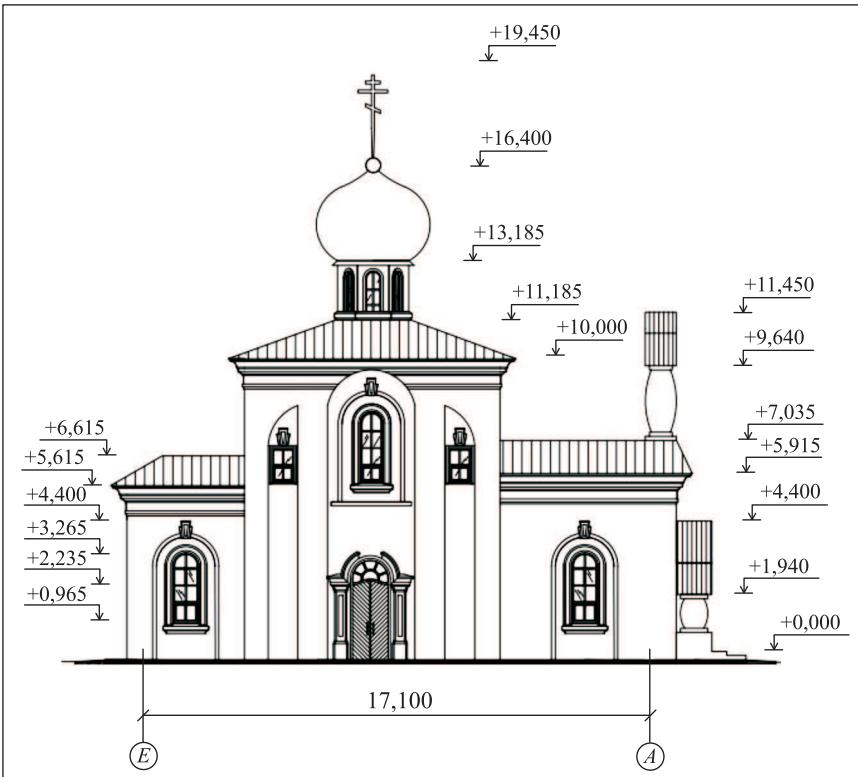


Рис. 2. Исследуемый храм

женных в данном случае в нижнем ярусе оконных проемов (4 приточных фрамуги с размерами 500×300 в трех окнах) и в барабане храма (4 вытяжных фрамуги 200×200 в четырех окнах барабана храма). Данная система работает без потребления электрической энергии и обладает свойством саморегулируемости, т.е. интенсивность работы системы зависит от климатических условий, количества прихожан и количества горящих свечей (рис. 3).

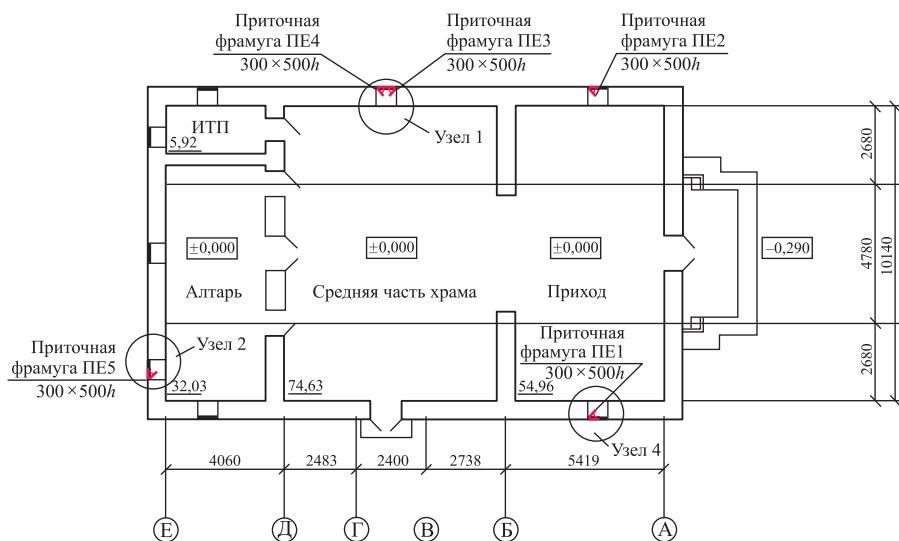


Рис. 3. Пример установки приточных фрамуг

Для работы этой системы фрамуги в барабане храма должны всегда быть открытыми. При закрытии фрамуг воздух застаивается под сводами и в барабане вместе с углекислым газом, водяными парами и сажей от свечей, что может привести к негативным последствиям (выпадение конденсата, образование плесени, налета сажи на фресках и т.д.) [7–10]. Во избежание «обморожения» храма от чрезмерного количества открытых вытяжных отверстий, количество вытяжных фрамуг устанавливается исключительно из расчета на зимний период (4 вытяжные фрамуги 200×200 в четырех окнах барабана храма).

Вентиляция алтаря не участвует в общем воздухообмене, поскольку это помещение изолировано от молельного зала. Для вентиляции алтаря может быть рассмотрено несколько вариантов, самые интересные из которых:

- установка вытяжной переточной решетки в стене, отделяющей молельный зал от алтаря, приняв первый вариант в качестве приточной вентиляции;
- установка осевого вытяжного вентилятора с воздуховодами через оконный проем или проем в стене.

Системы отопления. Тепловой насос – это устройство для переноса тепловой энергии от источника низкопотенциальной тепловой энергии (с низкой температурой) к потребителю (теплоносителю) с высокой температурой. Тепловые насосы делятся на несколько типов, основные из которых воздух-вода, грунт-вода и вода-вода.

В качестве низкопотенциального источника теплоты в данной работе используется теплота грунта. Это одна из самых эффективных схем, которая предусматривает отбор тепла от грунта, чья температура не меняется в течение года уже на глубине нескольких метров. Замкнутый контур может быть горизонтальным и вертикальным. В связи с тем, что площадь земельного участка храма не позволяет уложить контур горизонтально, он размещается в вертикально пробуренных шести скважинах глубиной 77 м (рис. 4).

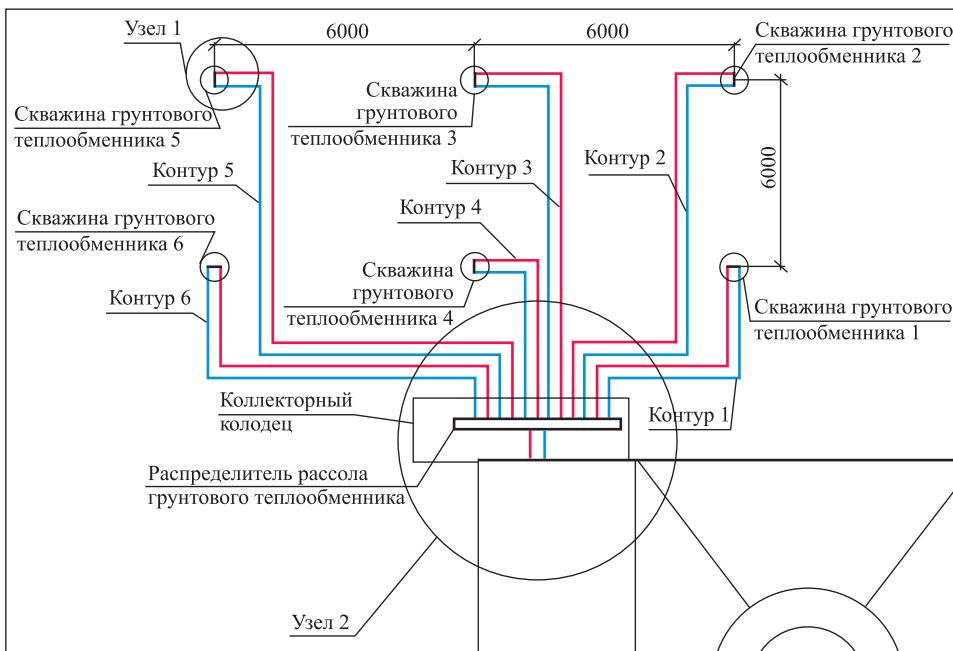


Рис. 4. План расположения грунтовых теплообменников

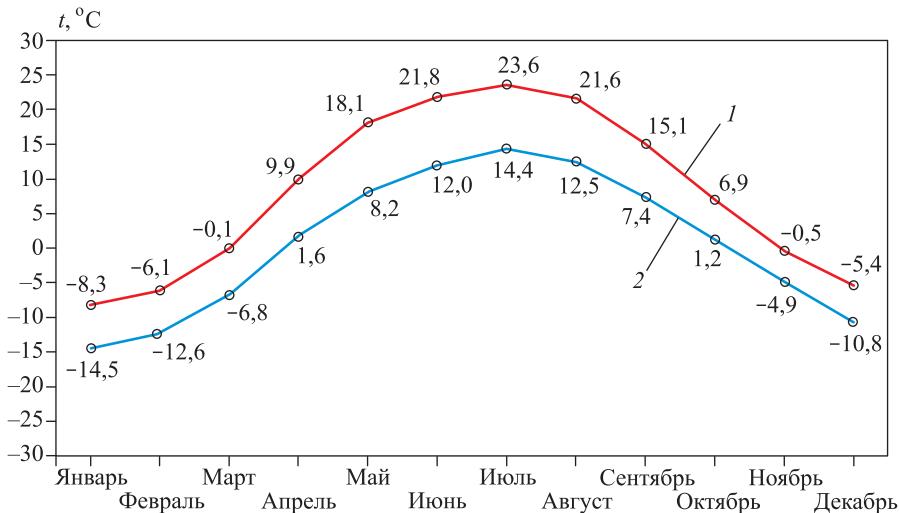


Рис. 5. Среднемесячные климатические данные для Нижнего Новгорода
1 – температура воздуха в дневное время; 2 – температура воздуха в ночное время

Тепловой насос (ТН) работает тем эффективнее, чем меньше разница между температурой источника низкопотенциальной тепловой энергии и температурой потребителя. Более эффективно теплоносильные установки для отопления в храмах могут применяться в системах теплого пола.

В наиболее холодные дни в храме предусмотрен резервный источник тепла – электрический котел. Радиаторы установлены под каждым оконным проемом в нижнем ярусе храма.

Так как работа пикового источника тепла требуется при понижении наружного воздуха до -20°C (когда работа ТН неэффективна), согласно графику (рис. 5), мы можем увидеть, что ТНУ может работать на протяжении всего отопительного сезона.

Выводы. 1. При проектировании инженерных коммуникаций в православных храмах необходимо больше внимания уделять архитектурным и конструктивным особенностям сооружения.

2. Системы естественной вентиляции могут быть использованы не только для молельного зала, но и для смежных с ним помещений при отсутствии перегородок между ними или наличии переточных решеток.

3. Экономленная электрическая энергия от установки систем естественной вентиляции вместо механической может быть направлена на электроснабжение системы теплоснабжения.

4. В качестве возобновляемых источников для получения тепловой энергии, при наличии места для размещения внутри храма, наиболее гармонично (без нарушения внешнего и внутреннего убранства) подходят тепловые насосы.

5. Поскольку тепловые насосы более эффективно работают с теплым полом, с целью исключения обморожения купола храма в зимний период года для наиболее холодных дней нужно предусмотреть радиаторную систему отопления.

6. Каждый проект инженерных коммуникаций для различных храмов необходимо выполнять индивидуально с учетом конструктивных и климатических особенностей.

7. Следует применять тепловые насосы преимущественно типа грунт-вода, однако наравне с ними могут использоваться насосы вода-вода при наличии прилегающего к территории храма водоема.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кочев А.Г. Микроклимат православных храмов: моногр. Н. Новгород: ННГАСУ, 2004. 449 с.: ил.
2. Кочев А.Г., Соколов М.М. Влияние внешней аэродинамики на микроклимат православных храмов: науч. моногр. Н. Новгород: ННГАСУ, 2017. 188 с.: ил.
3. Кочев А.Г., Соколов М.М. Теоретические и экспериментальные исследования влияния внешних аэродинамических характеристик на параметры микроклимата в православных храмах // Приволж. науч. журн. 2011. № 1. С. 58–65.
4. Кочев А.Г., Федорова О.В., Соколов М.М. Расчет воздухообменов для осушки конструкций и аэрации в культовых зданиях // Изв. вузов. Строительство. 2013. № 2-3. С. 60–67.
5. Кочев А.Г., Соколов М.М. Физико-математическое описание естественной конвекции в помещениях православных храмов // Приволж. науч. журн. 2012. № 2. С. 78–85.
6. Кочев А.Г., Соколов М.М., Сергиенко А.С., Кочева Е.А. Анализ полей аэродинамических коэффициентов православных храмов Нижнего Новгорода // Приволж. науч. журн. 2014. № 4. С. 146–151.
7. Кочев А.Г., Соколов М.М., Кочева Е.А., Москаева А.С. Определение расхода свечей как важной составляющей теплового баланса православного храма // Приволж. науч. журн. 2016. № 2. С. 56–62.
8. Кочев А.Г., Соколов М.М., Сергиенко А.С., Москаева А.С., Кочева Е.А. Особенности создания микроклимата в православных храмах // Изв. вузов. Строительство. 2016. № 4. С. 74–82.
9. Кочев А.Г., Соколов М.М., Кочева Е.А., Москаева А.С. Реконструкция систем создания и поддержания микроклимата в православных храмах // АВОК: Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика. 2017. Т. 2, № 2. С. 26–33.
10. Соколов М.М. Использование возобновляемых и нетрадиционных источников энергии: Учебн. пособие. Н. Новгород: ННГАСУ, 2015. 116 с.

Кочев Алексей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф.

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Соколов Михаил Михайлович, канд. техн. наук, доц.

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Кочева Елена Алексеевна, асп.

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Жарнаков Александр Сергеевич, студ.

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 10.08.17

Kochev Alexey Gennadievich, DSc, Professor

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Sokolov Mikhail Mikhailovich, PhD, Ass. Professor

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Kocheva Elena Alexeevna, Post-graduate Student

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Zharnakov Aleksandr Sergeevich, Student

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF ENERGY SAVING TECHNOLOGIES IN ORTHODOX CHURCHES

In the article the various aspects of the application of energy saving measures in Orthodox churches, such as energy efficient natural ventilation systems and the use of renewable energy sources are discussed. In the section of architectural analysis, a rationale for choosing a cult structure to hold energy-saving measures in it is given. In the section of the natural ventilation system, recommendations for installing the supply and exhaust manifolds using a specific example are given. In the heating system section, a heat pump is considered as a source.

К e y w o r d s : orthodox churches, aerodynamics, microclimate, heat pumps, renewable energy sources, aeration.

REFERENCES

1. Kochnev A.G. Mikroklimat pravoslavnnykh khramov: monografiya [Microclimate of orthodox temples]. Nizhny Novgorod, 2004. 449 p.: ill. (in Russian)
2. Kochnev A.G., Sokolov M.M. Vliyanie vneshej aerodynamiki na mikroklimat pravoslavnnykh khramov: nauchnaya monografiya [Influence of external aerodynamics on the microclimate of orthodox temples: scientific monograph]. Nizhny Novgorod, 2017. 188 p.: ill. (in Russian)
3. Kochnev A.G., Sokolov M.M. Teoreticheskie i eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya vneshej aerodynamicheskikh kharakteristik na parametry mikroklimata v pravoslavnnykh khramakh [Theoretical and experimental studies of the influence of external parameters on the aerodynamic characteristics of the microclimate in the Orthodox temples]. Privilzhskiy nauchnyy zhurnal [Volga scientific journal]. 2011. No.1. Pp. 58–65. (in Russian)
4. Kochnev A.G., Fedorova O.V., Sokolov M.M. Raschet vozdukhooobmenov dlya osushki konstruktsiy i aeratsii v kul'tovykh zdaniyakh [Air exchange for drying of structures and aeration in religious buildings]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2013. No. 2–3. Pp. 60–67. (in Russian)
5. Kochnev A.G., Sokolov M.M. Fiziko-matematicheskoe opisanie estestvennoy konvektsii v pomeshcheniyakh pravoslavnnykh khramov [Physical and mathematical description of the natural convection in the premises of the Orthodox temples]. Privilzhskiy nauchnyy zhurnal [Volga scientific journal]. 2012. No. 2. Pp. 78–85. (in Russian)
6. Kochnev A.G., Sokolov M.M., Sergienko A.S., Kocheva E.A. Analiz polej aerodynamicheskikh koefitsientov pravoslavnnykh khramov Nizhnego Novgoroda [Analysis of fields of aerodynamic coefficients of Orthodox churches in Nizhny Novgorod]. Privilzhskiy nauchnyy zhurnal [Volga scientific journal]. 2014. No. 4. Pp. 146–151. (in Russian)

7. Kochev A.G., Sokolov M.M., Kocheva E.A., Moskaeva A.S. Opredelenie raskhoda svechey kak vazhnoy sostavlyayushchey teplovogo balansa pravoslavnogo khrama [Determination of the consumption of candles as an important component of the heat balance of the orthodox temples]. Privolzhskiy nauchnyy zhurnal [Volga scientific journal]. 2016. No. 2. Pp. 56–62. (in Russian)
 8. Kochev A.G., Sokolov M.M., Sergienko A.S., Moskaeva A.S., Kocheva E.A. Osobennosti sozdaniya mikroklimata v pravoslavnnykh khramakh [Features of microclimate creation in orthodox churches]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2016. No. 4. Pp. 74–82. (in Russian)
 9. Kochev A.G., Sokolov M.M., Kocheva E.A., Moskaeva A.S. Rekonstruktsiya sistem sozdaniya i podderzhaniya mikroklimata v pravoslavnnykh khramakh [Reconstruction of systems for creating and maintaining a microclimate in orthodox temples]. AVOK: Ventlyatsiya, otoplenie, konditsionirovaniye vozdukha, teplosnabzhenie i stroitel'naya teplofizika [AVOK: Ventilation, heating, air conditioning, heat supply and construction thermal physics]. 2017. T. 2, No. 2. Pp. 26–33. (in Russian)
 10. Sokolov M.M. Ispol'zovanie vozobnovlyaemykh i netraditsionnykh istochnikov energii [The use renewable and alternative energy sources]. Nazhny Novgorod, 2015. 116 p. (in Russian)
-

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА



УДК 69.003 : 658.566

В.С. ВОРОБЬЕВ, Т.В. БОБРОВА, А.М. ПОПОВ, Ю.В. ПОПОВА

УПРАВЛЕНИЕ ПОСТАВКАМИ ПОЛИПРОДУКТА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОЕКТОВ В ЗОНАХ ИНДУСТРИАЛЬНОГО ОСВОЕНИЯ

Отличительная особенность зон индустриального строительства состоит в отсутствии складских комплексов и производств продукции. В статье изложен системный подход к бесперебойному обеспечению фронта работ за счет поставок готовых производственных объектов от производителей, производства в пунктах строительства линейно-рассредоточенных объектов с промежуточным хранением в подразделениях производственно-технологической комплектации. Материальные потоки описаны системой дифференциальных уравнений. Сформулирована задача оптимального управления поставками и запасами полипродукта.

Ключевые слова: строительство, проект, ресурс, полипродукт, издержки, оптимальное управление, строительная логистика, модель.

Развитие северных малоосвоенных территорий страны связано с проблемами природно-климатических, культурно-бытовых, организационно-хозяйственных, социально-экономических и региональных особенностей [1]. Малонаселенность территорий, низкое качество путей сообщения, отсутствие достаточной транспортной доступности, в том числе в местах размещения полезных ископаемых, побуждают исследователей, проектировщиков и строителей решать комплексные задачи формирования строительного комплекса, призванного возводить горно-обогатительные комбинаты, объекты социального назначения, жилые поселки и города, объединенные сетью железных и автомобильных дорог с выходом на магистральные пути сообщения [2].

Исследования транспортно-логистических и складских комплексов не в полной мере отражают обеспечение процесса реализации крупных и мегапроектов, бесперебойное снабжение и регулирование поставок ресурсов, их хранение и отток к местам производства строительных работ, увязанных с темпами строительства [3–5]. К таким регионам относятся объекты

южной Якутии, включенные в Комплексную программу освоения и переработки сырьевых ресурсов [2]. Транспортной стратегией России предусматриваются освоение территорий восточной Якутии с выходом к Берингову проливу и ряд других проектов. В этих регионах система транспортно-складской логистики не может обеспечить строительство линейно-рассредоточенных и промышленно-гражданских объектов в системной увязке поставок ресурсов и потребностей выполняемых работ в процессе их реализации [6–8]. Поэтому исследование и построение моделей оптимального управления поставками и запасами на строительстве рассредоточенных объектов актуальны [9].

Цель настоящего исследования – разработка и анализ модели управления поставками полипродукта, используемого строительными организациями при возведении рассредоточенных объектов. Выполненное исследование развивает теоретические обобщения системного подхода к строительной логистике и является продолжением работы [10]. Оно базируется на следующих гипотезах.

1. Строительство линейно-рассредоточенного объекта и промышленно-гражданской инфраструктуры, примыкающей к железной или автомобильной дороге, осуществляется силами нескольких строительно-монтажных подразделений (СМП) той или иной формы собственности, выполняющих комплексы специализированных работ в технологической последовательности с заданным опережением фронтов по расстоянию, объему или времени. При этом каждому из них присущи собственный вид работ и соответствующий моноресурс.

2. Потребность в ресурсе во времени для производства работ по каждому виду является кусочно-постоянной функцией и распадается на две составляющие. Первая из них связана с основными работами на трассе, а вторая – со вспомогательными. Под вспомогательными работами понимаются работы, направленные на строительство и развитие притрассовой автодороги, пунктов производства (разработка щебеночных карьеров, ПГС, бетонных заводов, складов, погрузочно-разгрузочных средств и т.д.).

3. Скорость перемещения фронта работ СМП существенно ниже скорости транспортировки соответствующего ему ресурса и, кроме того, фронт работ первой очереди всегда опережает фронт работ второй очереди, последние опережают третью очередь и т.д. Иначе говоря, фронты работ всех СМП должны быть строго упорядочены в соответствии с технологической последовательностью их производства. Или, конкретнее, работы по расчистке трассы всегда должны предшествовать работам по отсыпке земляного полотна, последние предшествуют укладке пути и т.д.

Следующая гипотеза характеризует закон изменения скорости перемещения фронта работ каждого вида.

4. Скорость перемещения фронта работ каждого СМП прямо пропорциональна мощности, затрачиваемой на основные работы и обратно пропорциональна удельным объемам основных работ. Она меньше на величину, прямо пропорциональную мощности СМП, затрачиваемой на производство вспомогательных работ, и обратно пропорциональную удельным объемам вспомогательных работ.

5.1. Интенсивность приема любого продукта, предназначенного для производства основных работ, на склад соответствующего СМП растет, если фактический запас продукта ниже страхового и если запас продукта, находящийся в транспортировке на смежном звене, выше нормативного, и падает в противном случае.

5.2. Интенсивность приема любого продукта, предназначенного для производства вспомогательных работ, на склад соответствующего СМП растет, если фактический запас продукта, потребляемого на вспомогательных работах, ниже страхового и если запас продукта, находящийся в транспортировке на смежном звене, выше, и соответственно падает в противном случае.

6. Интенсивность приема любого продукта на произвольный склад трассы растет, если запас этого продукта на смежном транспортном звене, осуществляющем передачу продукта в рассматриваемый пункт, ниже нормативного и если мощность СМП, затрачиваемая на производство вспомогательных работ, больше нуля и соответственно падает, если запас выше нормативного.

7. Интенсивность отгрузки любого продукта из произвольного пункта трассы слагается из двух составляющих. Первая из них растет, если запас этого продукта на транспортном звене, принимающем продукт из рассматриваемого пункта, ниже нормативного и соответственно падает, если он выше нормативного. Вторая составляющая растет, если мощность СМП, затрачиваемая на производство вспомогательных работ, больше нуля.

8. Интенсивность производства любого продукта в любом пункте трассы слагается из трех составляющих.

Первая из них повышается, если СМП, потребляющее данный продукт, приближается к зоне производственного влияния, поддерживается максимально возможной, если СМП находится внутри зоны и соответственно уменьшается, если СМП удаляется от вышеуказанной зоны.

Вторая составляющая растет, если фактический запас рассматриваемого продукта ниже страхового уровня, и соответственно падает, если он выше страхового.

Третья составляющая растет, если мощность СМП, затрачиваемая на производство вспомогательных работ, больше нуля.

9. Составляющие закона изменения интенсивности производства и погрузочно-разгрузочных операций во всех пунктах и на складе СМП по любому продукту, обусловленные соотношениями между фактическими и нормативными или страховыми уровнями запасов, являются линейными функциями от соответствующих разностей.

Образование функций интенсивности производства и погрузочно-разгрузочных операций. В соответствии с гипотезами 5.1, 5.2 и 9 выражение для интенсивности приема продукта на склад СМП μ , когда работы производятся на i -м участке, можно записать в следующем виде [6]

$$\mu(t + \Delta t) = \mu(t) + [\alpha_i(\eta - w) + S_i(B_i - y_i)]\Delta t,$$

где η – страховой уровень запаса продукта на складе СМП;

w – запас продукта на складе СМП;

B_i – запас продукта, находящийся в транспортировке на i -м участке;

y_i – нормативный уровень запаса продукта, находящийся на i -м участке трассы;

m – число участков.

В результате предельного перехода при $\Delta t \rightarrow 0$ получаем

$$\frac{d\mu}{dt} = \alpha_i (\eta - w) + S_i (B_i - y_i).$$

Коэффициенты α_i и S_i показывают, как изменяется интенсивность приема продукта на склад СМП, если величина рассогласования фактического запаса продукта со страховыми и соответственно величина рассогласования фактического объема транспортируемого груза с нормативными составляет единицу. Полученное выражение означает, что скорость изменения интенсивности приема продукта линейно зависит от величины рассогласования фактического запаса продукта на складе СМП с его страховой величиной. Кроме того, скорость зависит также и от величины рассогласования нормативного запаса с фактическим на звене, являющимся объектом деятельности СМП.

Рассмотрим теперь закон изменения интенсивности приема продукта на склад β_j в произвольном j -м пункте.

В соответствии с гипотезой 6, поступая как и прежде, получим

$$\frac{d\beta_j}{dt} = \begin{cases} S_j (B_j - y_j), & j = \overline{1, i-1} \\ S_{j+1} (B_{j+1} - y_{j+1}), & j = \overline{i, m-1} \end{cases}$$

Выражение для интенсивности отгрузки продукта из произвольного пункта трассы также легко выводится с учетом утверждения гипотезы 7.

Имеем

$$\frac{d\delta_j}{dt} = \begin{cases} S_{j+1} (y_{j+1} - B_{j-1}), & j = \overline{0, i-1} \\ S_j (y_j - B_j), & j = \overline{i, m-1} \end{cases}$$

Приведем некоторое обобщение постановки задачи управления поставками и запасами на трассе. Это обобщение связано с расширением сферы действия таких параметров, как нормативные уровни запасов транспортируемого на отдельных звеньях продукта, страховые запасы в пунктах трассы, а также страховой запас продукта на складе СМП.

В рассматриваемом случае система гипотез 5–8 соответствующим образом модифицируется. Эта модификация основана на том предположении, что законы изменения всех вышеуказанных интенсивностей связаны с рассогласованием фактических запасов продукта с нормативными во всех пунктах и звеньях трассы. Соответствующим образом, очевидно, модифицируются и дифференциальные уравнения.

И, в частности, имеем для закона изменения интенсивности получения продукта на склад СМП

$$\frac{d\mu}{dt} = \alpha_i (\eta - w) + \sum_{j=1}^m S_{ji} (B_j - y_i) + \sum_{j=0}^m \lambda_{ji} (A_j - \eta_j).$$

Здесь A_j – запас продукта, находящийся в j -м пункте.

Коэффициент λ_{ji} показывает, как изменяется интенсивность приема продукта во всех пунктах и звеньях трассы при рассогласовании фактического запаса продукта со страховым.

Для дифференциальных уравнений, описывающих закон изменения интенсивностей производства продукта в пунктах трассы, имеем выражение:

$$\frac{d\gamma_j}{dt} = \sum_{k=0}^m \lambda_{kj}^0 (\eta_k - A_k) + \sum_{k=0}^m S_{kj} (y_k - B_k) + r_j (\xi_j - r), \quad j = \overline{0, m}.$$

Здесь γ_j – интенсивность производства продукта в j -м пункте;

ξ_j – параметр управления интенсивностью производства, обусловленный местонахождением СМП.

Для дифференциальных уравнений, описывающих закон изменения интенсивностей производства продукта в пунктах смежных звеньев трассы, выражения записываем в виде:

$$\frac{d\beta_j}{dt} = \sum_{k=0}^m \lambda'_{kj} (\eta_k - A_k) + \sum_{k=1}^m S'_{kj} (B_k - y_k), \quad j = \overline{1, m-1}.$$

Соответственно для закона изменения интенсивностей отгрузки имеем:

$$\frac{d\delta_j}{dt} = \sum_{k=0}^m \lambda''_{kj} (A_k - \eta_k) + \sum_{k=1}^m S''_{kj} (y_k - B_k), \quad j = \overline{0, m}.$$

Формулировка и обсуждение задачи оптимального управления поставками и запасами на трассе. Из анализа экономического существа задачи можно увидеть, что все множество параметров системы распадается на два класса.

Переменные параметры первого класса характеризуются тем, что ими относительно легко варьировать в процессе функционирования системы. В их число входят:

$$\omega, \eta, y_j, (j = \overline{1, m}), \eta_j, (j = \overline{0, m}), \xi_j, (j = \overline{0, m}).$$

Параметры этого класса будем называть управляемыми переменными или управлениями.

Во второй класс входят те из них, прямое варьирование которыми в процессе функционирования территориально-строительной системы (ТСС) либо затруднено, либо невозможно. Сюда относятся переменные:

$$z, w, A_j, (j = \overline{0, m}), B_j, (j = \overline{1, m}), \mu, \beta_j, (j = \overline{1, m-1}), \delta_j, (j = \overline{0, m}), \gamma_j, (j = \overline{0, m}).$$

Ниже множество этих параметров будем называть фазовыми переменными или координатами. Управление движением системы (функционированием ТСС) осуществляется с помощью управляемых переменных, которые принимают значения из некоторой области U , которая, вообще говоря, является ограниченной для реальных технико-экономических систем (в том числе и для ТСС). Текущий вектор управления будем обозначать через $u(t)$:

$$u(t) = (\omega(t), \eta(t), \{y_j(t)\}_{j=\overline{1, m}}, \{\eta_j(t)\}_{j=\overline{0, m}}, \{\xi_j(t)\}_{j=\overline{0, m}}).$$

Теперь факт принадлежности области можно записать соотношением $u(t) \in U$. В частном случае эта область может представлять собой многомерный параллелепипед, описываемый следующей системой неравенств:

$$\underline{\omega} \leq \omega \leq \bar{\omega}, \underline{\eta} \leq \eta \leq \bar{\eta}, \underline{y_j} \leq y_j \leq \bar{y_j}, (j = \overline{1, m}),$$

$$\underline{\eta_j} \leq \eta_j \leq \bar{\eta_j}, (j = \overline{0, m}) \quad \underline{\xi_j} \leq \xi_j \leq \bar{\xi_j}, (j = \overline{0, m}).$$

Экономический смысл этих неравенств состоит в том, что допустимые управлениа не должны превышать итоговых значений, так как выход какой-нибудь управляющей координаты за пределы области управления может привести к неблагоприятным для ТСС последствиям. К числу последних относятся: «разрушение» системы, ее «разрегулировка», невозможность функционирования ТСС по каким-либо техническим, технологическим, экономическим или другим показателям и т.д. Назначение границ изменения отдельных координат вектора управлений осуществляется, исходя из конкретных условий рассматриваемой ТСС.

Реальное движение системы происходит также в некоторой (вообще говоря, ограниченной) области пространства X . Обозначим ее через G , тогда, очевидно, справедливо соотношение $G \subseteq X$. Обозначим текущий вектор фазового пространства через $x(t)$:

$$x(t) = (z(t), w(t), B(t), \mu(t), \beta(t), \delta(t), \gamma(t)),$$

$$\text{где } A(t) = (A_0(t) \dots A_m(t)), \quad B(t) = (B_0(t) \dots B_m(t)), \quad \delta(t) = (\delta_0(t) \dots \delta_m(t)),$$

$$\gamma(t) = (\gamma_0(t) \dots \gamma_m(t)), \quad \beta(t) = (\beta_1(t) \dots \beta_{m-1}(t)).$$

Очевидно, что факт принадлежности фазовой области можно отразить соотношением $x(t) \in G$. В частном случае эта область может быть описана в виде системы неравенств: $0 \leq z \leq a_m$, $0 \leq w \leq \bar{w}$, $0 \leq A_j \leq \bar{A}_j$, $j = \overline{0, m}$, $0 \leq B_j \leq \bar{B}_j$, $j = \overline{1, m}$, $0 \leq \mu \leq \bar{\mu}$, $0 \leq \beta_j \leq \bar{\beta}_j$, $j = \overline{1, m}$, $0 \leq \delta_j \leq \bar{\delta}_j$, $j = \overline{0, m}$, $0 \leq \gamma_j \leq \bar{\gamma}_j$, $j = \overline{0, m}$.

Представленные соотношения имеют весьма прозрачный экономический смысл. Так, например, верхние границы для w , A_j и B_j означают недопустимость затоваривания соответствующих складов или звеньев ТСС, а для γ_j или β_j , δ_j и μ – ограниченность мощностей производства или соответствующих погрузочно-разгрузочных средств. Первое же неравенство означает, что строительство осуществляется на отрезке трассы $[0, a_m]$.

Другой частный случай представляется, когда фазовая область совпадает со всем фазовым пространством, т.е. $G \equiv X$.

Выпишем теперь начальные, конечные и промежуточные условия, которым должны удовлетворять фазовые координаты ТСС.

В начальный момент времени $t = 0$ СМП находится в точке $z(0) = 0$, имея при этом запас продукта $w(0) = w^0$, на j -м складе ТСС находится A_j^0 , а на j -м звене – B_j^0 единиц продукта. Производство продукта осуществляется в j -м пункте с интенсивностью γ_j^0 , погрузочно-разгрузочные операции на складе СМП происходят с интенсивностью μ^0 , а на складах пунктов трассы с интенсивностью δ_j^0 и β_j^0 соответственно. Иными словами справедлива система равенств: $z(0) = 0$, $w(0) = w^0$, $A_j(0) = A_j^0$, $j = \overline{0, m}$, $B_j(0) = B_j^0$, $j = \overline{1, m}$, $\mu(0) = \mu^0$, $\beta_j(0) = \beta_j^0$, $j = \overline{1, m-1}$, $\delta_j(0) = \delta_j^0$, $j = \overline{0, m-1}$, $\gamma_j(0) = \gamma_j^0$, $j = \overline{0, m-1}$.

Обозначим через t_m момент завершения строительства трассы, тогда конечные условия можно записать в следующей форме: $z(t_m) = a_m$, $w(t_m) = w^m$, $A_j(t_m) = A_j^m$, $j = \overline{0, m}$, $B_j(t_m) = B_j^m$, $j = \overline{1, m}$, $\mu(t_m) = 0$, $\beta_j(t_m) = 0$, $j = \overline{1, m-1}$, $\delta_j(t_m) = 0$, $j = \overline{0, m}$, $\gamma_j(t_m) = 0$, $j = \overline{0, m}$.

Полученная выше система дифференциальных уравнений на каждом участке строительства i описывается как бы заново. Это выражается в том, что на каждом звене i ТСС имеет индивидуальный набор коэффициентов π_i , q_i , α_i . Иначе говоря, при переходе СМП с одного звена на другое система уравнений, описывающих функционирование ТСС, претерпевает скачок по правой части. В силу этого для полного описания задачи управления ТСС необходимо описать промежуточные условия.

Зададим семейство гиперплоскостей $z(t_i) = a_i$. Изменение закона функционирования системы будет заключаться в том, что в некоторые моменты времени t_i , пересечения фазовой траектории системы с гиперповерхностью $z(t_i) = a_i$, правые части системы дифференциальных уравнений претерпевают скачок (переход на $i+1$ участок), а гиперповерхность заменяется на $z(t_{i+1}) = a_{i+1}$. Указанный факт можно записать в виде следующего условия: $\forall t_i, t_i \in \{t : z(t) = a_i, i = \overline{1, m}\}$.

Скорость перемещения фронта работ k -вида (скорость перемещения k -СМП)

$$\frac{dz_k}{dt} = q_{ik}^{Tk} \omega_k - q_{ik}^{\Pi k} \varphi_k, \quad (1)$$

где q_{ik}^{Tk} и $q_{ik}^{\Pi k}$ – представляют собой величины, обратные объемам работ основного и соответственно вспомогательного строительства.

Для баланса продукта, направленного на основное и вспомогательное строительство, соответственно имеем:

$$\frac{dW_k^T}{dt} = \mu_k^T - \pi_{ik}^{Tk} q_{ik}^{Tk} \omega_k, \quad (2)$$

$$\frac{dW_k^{\Pi}}{dt} = \mu_k^{\Pi} - \pi_{ik}^{\Pi k} q_{ik}^{\Pi k} \varphi_k. \quad (3)$$

В приведенных уравнениях π_{ik}^{Tk} и $\pi_{ik}^{\Pi k}$ – удельные покилометровые потребности в продукте по основному и соответственно вспомогательному строительству. Балансовые уравнения для запасов произвольного продукта в пунктах трассы:

$$\frac{dA_j^k}{dt} = \begin{cases} \gamma_0^k - \delta_0^k, & j = 0 \\ \gamma_j^k + \beta_j^k - \delta_j^k, & j = \overline{1, m-1} \\ \gamma_m^k - \delta_m^k, & j = m \end{cases} \quad (4)$$

С учетом расхода продукта на производство основных и вспомогательных работ балансовые уравнения каждого звена также модифицируются:

$$\frac{dB_j^k}{dt} = \begin{cases} \delta_{j-1}^k - \beta_j^k, & j = \overline{1, i_k - 1} \\ \delta_{j-1}^k + \delta_j^k - \mu_k^T - \mu_k^\Pi, & j = i_k \\ \delta_j^k - \beta_{j-1}^k, & j = \overline{i_k + 1, m} \end{cases} \quad (5)$$

Приведенные уравнения имеют по существу прежний смысл, однако они записываются для каждого вида продукта.

Система дифференциальных уравнений, описывающих законы изменения интенсивностей производства и погрузочно-разгрузочных операций в соответствии с гипотезами 5–9, сводится к следующей:

$$\frac{d\mu_k^T}{dt} = \alpha_{i_k}^{Tk} (\eta_k^T - W_k^T) + S_{i_k}^{Tk} (B_{i_k}^k - y_{i_k}^k); \quad (6)$$

$$\frac{d\mu_k^\Pi}{dt} = \alpha_{i_k}^{\Pi k} (\eta_k^\Pi - W_k^\Pi) + S_{i_k}^{\Pi k} (B_{i_k}^k - y_{i_k}^k); \quad (7)$$

$$\frac{d\beta_j^k}{dt} = t_{\beta j k} \varphi_k + \begin{cases} S_j^k (B_j^k - y_j^k), & j = \overline{1, i_k - 1} \\ S_{j+1}^k (B_{j+1}^k - y_{j+1}^k), & j = \overline{i_k, m}; \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{d\delta_j^k}{dt} = t_{\delta j k} \varphi_k + \begin{cases} S_{j+1}^k (y_{j+1}^k - B_{j+1}^k), & j = \overline{0, i_k - 1} \\ S_j^k (y_j^k - B_j^k), & j = \overline{i_k, m}; \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{d\gamma_j^k}{dt} = t_{\gamma j k} \varphi_k + \lambda_j^k (\eta_j^k - A_j^k) + z_j^k (\xi_j^k - z_k). \quad (10)$$

В представленных уравнениях члены, содержащие $t_{\beta j k}$, $t_{\delta j k}$ и $t_{\gamma j k}$, отражают рост соответствующих интенсивностей, обусловленный затратами по развитию притрассовой автодороги, системы складов и производственной базы. Здесь $t_{\beta j k}$, $t_{\delta j k}$ и $t_{\gamma j k}$ показывают насколько изменяются соответствующие интенсивности в j -м пункте в единицу времени, если производственная мощность СМП, прилагаемая на вспомогательные работы, равна единице.

Для дальнейшей конкретизации постановки проблемы управления поставками многих продуктов необходимо ввести систему ограничений на управляющие системы (описать область управления):

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^N \omega_k &\leq \bar{\omega}, \quad \underline{\omega}_k \leq \omega_k \leq \bar{\omega}_k, \quad k = \overline{1, N}, \quad \sum_{k=1}^N \eta_k \leq \bar{\eta}; \quad \underline{\eta}_k \leq \eta_k \leq \bar{\eta}_k, \\ \sum_{k=1}^N y_j^k &\leq \bar{y}_j; \quad \underline{y}_j^k \leq y_j^k \leq \bar{y}_j^k, \\ \sum_{k=1}^N \eta_j^k &\leq \bar{\eta}_j; \quad \underline{\eta}_j^k \leq \eta_j^k \leq \bar{\eta}_j^k; \quad \underline{\xi}_j^k \leq \xi_j^k \leq \bar{\xi}_j^k; \quad j = \overline{1, m}, \quad k = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (11)$$

Опишем также допустимую область изменения фазовых координат:

$$\begin{aligned} a_m \geq z_1 \geq z_2 \geq \dots \geq z_N \geq 0, \quad 0 \leq w_k \leq \bar{w}_k, \quad 0 \leq A_j^k \leq \bar{A}_j^k, \quad 0 \leq \mu_k \leq \bar{\mu}_k, \\ 0 \leq \beta_j^k \leq \bar{\beta}_j^k, \quad 0 \leq \delta_j^k \leq \bar{\delta}_j^k, \quad 0 \leq \gamma_j^k \leq \bar{\gamma}_j^k, \quad j = \overline{1, m}, \quad k = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (12)$$

Структуру начальных и конечных условий опишем в общем виде:

$$x(0) = x^0, \quad (13)$$

$$x(t_m) = x^m, \quad (14)$$

где под $x(t)$ понимается набор всех фазовых координат ТСС.

Для промежуточных состояний ТСС требуется выполнение следующих:

$$\forall t_{i_k}, t_{i_k} \in \{t : z_k(t) = a_i, i = \overline{1, m}, k = \overline{1, N}\}. \quad (15)$$

Выражение для функционала системы для совокупных издержек

$$L = \sum_{k=1}^N (L^k + l_k), \quad (16)$$

где L^k – совокупные издержки по k -виду работ;

l_k – издержки по вспомогательным работам.

$$l_k = \sum_{j=1}^m \int_{t_{j-1}}^{t_j} C_{jk}^{\Pi} \gamma_{jk} dt + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \int_{t_{j-1}}^{t_j} C_{jk}^0 (\delta_j^k + \beta_j^k) dt + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \int_{t_{j-1}}^{t_j} C_{jk}^3 (\delta_{j-1}^k + \beta_j^k) dt, \quad (17)$$

где C_{jk}^{Π} , C_{jk}^0 , C_{jk}^3 – капитальные затраты на развитие производственных мощностей, мощностей погрузочно-разгрузочного оборудования, транспортных звеньев и средств доставки, связанных с обработкой k -продукта.

Обобщенный вариант постановки задачи оптимального управления поставками и запасами многих продуктов формулируется так.

Требуется найти кусочно-непрерывное управление $u(t)$ $0 \leq t \leq t_m$, принадлежащее области управления (11), которое переводит систему (1)–(10) из начального состояния (13) в конечное (14), удовлетворяя ограничениям (12), промежуточным условиям (15) и доставляющее при этом минимум функционалу (16).

Заключение. Строительство мегапроектов, к которым относятся линейно-рассредоточенные объекты: железные и автомобильные дороги, газопроводы, сети электропередач, промышленно-гражданские и социальные объекты, для строителей связано с большими капитальными вложениями и продолжительными сроками их реализации. Поэтому системный подход к решению задач строительства и его материально-технологического обеспечения является основой оптимизации строительных процессов по критерию минимизации совокупных издержек.

Предлагаемая концепция оптимизации поставок и потребления полипродукта при реализации строительных проектов в зонах индустриального освоения может быть реализована эффективно на основе методов оптимального управления. Инструментарием для решения поставленных задач могут служить методы линейного и динамического управления, что повысит адекватность получаемых результатов фактическому состоянию реализации подобных проектов.

Дальнейший анализ оптимального метода управления транспортно-складской системы предлагается выполнить конкретизацией достоверных условий оптимальности к рассматриваемой проблеме.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акулатов Т.Э. Концепция оптимизации социальной и транспортной инфраструктуры северных территорий // Теория и практика общественного развития. 2012. № 8. С. 366–368.
2. Лунцина Е.В. Логистическая инфраструктура в комплексном развитии Южной Якутии // Теория и практика функционирования и развития транспортной системы Сибири. Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. акад. вод. трансп., 2013. С. 74–79.
3. Ларин О.Н., Приходько А.П., Шепелев В.Д., Кажаев А.А. Развитие транзитного потенциала автотранспортных систем регионов: Науч. моногр. М.: ВИНТИ РАН, 2010. 344 с.
4. Демиденко О.В. Оптимизация размера резерва материалов при возведении объектов строительства // Омский научный вестник. Сер. Общество. История. Современность. 2012. № 4. С. 100–103.
5. Демиденко О.В. Планирование комплектации строительных потоков // Омский науч. вестн. 2011. № 1. С. 43–45.
6. Муравьева Н.А. Подход к классификации технологических процессов в транспортно-складских системах // Вестн. СГТУ. 2013. № 2. Вып. 2. С. 316–318.
7. Демиденко О.В., Казаков В.А., Кузнецов С.М., Алексеев Н.Е. Модель функционирования строительных потоков // Вестн. СибАДИ. 2016. № 2. С. 89–95.
8. Бродецкий Г.Л., Прокурин Ю.Ю. Повышение эффективности цепей поставок при управлении запасами в строительстве // Логистика сегодня. 2012. № 5. С. 316–327.
9. Воробьев В.С. Организация управления запасами и поставками материальных ресурсов на новостройках в районах нового освоения // Изв. вузов. Строительство. 2004. № 9. С. 49–55.
10. Воробьев В.С., Ланис А.Л., Попова Ю.В. Оптимальное управление поставками и запасами материальных ресурсов на строительстве линейно-распределенных объектов // Изв. вузов. Строительство. 2017. № 7. С. 49–55.

Воробьев Валерий Степанович, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Боброва Татьяна Викторовна, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), г. Омск

Попов Анатолий Михайлович, д-р техн. наук, проф.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Попова Юлия Владимировна, препод.

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено 07.08.17

Vorob'ev Valeriy Stepanovich, DSc, Professor

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Bobrova Tatiana Viktorovna, DSc, Professor

Siberian State Automobile and Highway University, Omsk, Russia

Popov Anatoliy Mihaylovich, DSc, Professor

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Popova Yulia Vladimirovna, Lecturer

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

SUPPLY MANAGEMENT PRODUCT AT THE TIME OF IMPLEMENTATION OF CONSTRUCTION PROJECTS IN THE AREAS OF INDUSTRIAL DEVELOPMENT

A distinctive feature of the areas industrial construction is the absence of warehouse complexes and manufacturing products. The article outlines a systematic approach for the continuous provision of scope of work due to the supply of finished products from manufacturers, the production in points of construction of linear-distributed objects with intermediate storage units of production and processing equipment. Material flows are described by a system of differential equations. The problem of optimal control of supply and inventory of product.

Key words: construction, project, resource, cost, optimal control, construction logistics, model.

REFERENCES

1. Akbulatov T.E. Kontseptsiya optimizatsii sotsialnoy i transportnoy infrastruktury severnykh territoriy [Concept of optimization of social and transport infrastructure of the Northern territories]. Teoriya i praktika obshchestvennogo razvitiya [Theory and practice of social development]. 2012. No. 8. Pp. 366–368. (in Russian)
2. Lunitsina E.V. Logisticheskaya infrastruktura v kompleksnom razvitii Yuzhnay Yakutii [Logistics infrastructure in the comprehensive development of South Yakutia]. Teoriya i praktika funktsionirovaniya i razvitiya transportnoy sistemy Sibiri [Theory and practice of functioning and development of the transport system of Siberia]. Novosibirsk, 2013. Pp. 74–79. (in Russian)
3. Larin O.N., Prikhodko A.P., Shepelev V.D., Kazhaev A.A. Razvitie tranzitnogo potentsiala avtotransportnykh sistem regionov: nauchnaya monografiya [Development of transit potential of transport systems of regions: monograph]. Moscow, 2010. 344 p. (in Russian)
4. Demidenko O.V. Optimizatsiya razmera rezerva materialov pri vozvedenii ob'ektov stroitel'stva [Optimization of the size of the reserve materials in the construction of objects of construction]. Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Obshchestvo. Istorya. Sovremennost' [Omsk scientific Bulletin. Ser. Society. History. Modernity]. 2012. No. 4. Pp. 100–103. (in Russian)
5. Demidenko O.V. Planirovanie komplektatsii stroitel'nykh potokov [Planning complete the construction threads]. Omskiy nauchnyy vestnik [Omsk scientific Bulletin]. 2011. No. 1. Pp. 43–45. (in Russian)
6. Muravieva N.A. Podkhod k klassifikatsii tekhnologicheskikh protsessov v transportno-skladskikh sistemakh [Approach to the classification of technological processes in transport and warehouse systems]. Vestnik SGTU [Vestnik SGTU]. 2013. No. 2. Iss. 2. Pp. 316–318. (in Russian)
7. Demidenko O.V., Kazakov V.A., Kuznetsov S.M., Alekseev N.E. Model' funktsionirovaniya stroitel'nykh potokov [Model of functioning of the construction threads]. Vestnik SibADI [Vestnik SibADI]. 2016. No. 2. Pp. 89–95. (in Russian)
8. Brodetskiy G.L., Proskurina Yu.Yu. Povyshenie effektivnosti tsepey postavok pri upravlenii zapasami v stroitel'stve [Improving the efficiency of supply chains at inventory management in construction]. Logistika segodnya [Logistics today]. 2012. No. 5. Pp. 316–327. (in Russian)

9. Vorob'ev V.S. Organizatsiya upravleniya zapasami i postavkami material'nykh resursov na novostroykakh v rayonakh novogo osvoeniya [Organization of inventory control and supply material resources for new buildings in areas of new development]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2004. No. 9. Pp. 49–55. (in Russian)
 10. Vorob'ev V.S., Lanis A.L., Popova Yu.V. Optimal'noe upravlenie postavkami i zapasami material'nykh resursov na stroitel'stve lineyno-rassredotochennykh ob'ektov [Optimal control of supply and stocks of material resources in the construction of linear-distributed objects]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. 2017. No. 7. Pp. 49–55. (in Russian)
-

НАУЧНЫЕ ПРОБЛЕМЫ АРХИТЕКТУРЫ, ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКОЛОГИИ



УДК 711.553

Т.А. КОПЫЛОВА

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ШКАЛЫ УРОВНЕЙ ОБСЛУЖИВАНИЯ ИНТЕРМОДАЛЬНЫХ УЗЛОВ ГОРОДСКОГО ОБЩЕСТВЕННОГО ПАССАЖИРСКОГО ТРАНСПОРТА

В современном градостроительстве уделяется большое внимание планированию городских пространств, ориентированному на общественный пассажирский транспорт. В статье рассмотрен критерий «уровень обслуживания» пользователей терминалов воздушного сообщения – аэропортов и интермодального пассажирского узла. Предполагается, что уровень обслуживания транспортно-пересадочных узлов определяется полными затратами времени на пересадку. Сами границы уровней обслуживания предлагаются установить на основе показателей квантилей распределения значений общей продолжительности пересадки, полученных по результатам обследований интермодальных пассажирских узлов разных типов. Разработка оценочной шкалы уровней обслуживания осуществлена на основе данных обследования пересадочных узлов г. Вены (Австрия).

Ключевые слова: интермодальные узлы городского общественного пассажирского транспорта, уровень обслуживания, авиационные терминалы, продолжительность пересадки, градация уровней обслуживания.

Одна из важнейших концепций современного градостроительства формулируется как «планирование, ориентированное на общественный пассажирский транспорт» (Transit oriented development – TOD). Интермодальные узлы, в которых взаимодействуют различные виды городского общественно-пассажирского транспорта (ГОПТ) и осуществляются пересадки, становятся важнейшим видом городской транспортной инфраструктуры. Эффективное функционирование интермодальных узлов во многом определяет привлекательность ГОПТ и его конкурентные преимущества по отношению к индивидуальному автомобильному транспорту. В настоящее время существует задача оценки эффективности функционирования интермодальных узлов, которую можно решать путем применения показателя уровня обслуживания [1–4].

Изначально критерий «уровень обслуживания» (Level of Service, или LOS) был позаимствован из теории массового обслуживания и широко используется для оценки условий движения транспортных потоков. Показатель «уровень обслуживания» является качественной характеристикой, однако

Таблица 1. Скорости движения пешеходного потока в зависимости от его интенсивности и площади территории, принятые в Руководствах HCM 2000, 2010 [6, 7]

Уровень обслуживания	Пространство, м ² /пеш.	Плотность пешеходного потока, чел./м ²	Интенсивность, пеш./м/мин	Скорость, м/с	
				коридор/пандус	лестница
A	> 5,60	<0,18	16	1,30	> 1,9
B	3,7–5,6	0,18–0,27	16,1–23	1,25	1,6–1,9
C	2,2–3,7	0,27–0,45	23,1–33	1,15	1,1–1,6
D	1,4–2,2	0,45–0,71	33,1–49	1,00	0,7–1,1
E	0,75–1,4	0,71–1,33	49,1–75	0,70	0,5–0,7
F	< 0,75	> 1,33	Меняется, возможны заторы		< 0,5

его количественными характеристиками в зависимости от оцениваемого элемента стали скорость движения, величина средней задержки на перекрестках, задержки пешеходов; количество пассажиров, приходящееся на одно сидение, пространство в расчете на одного пассажира и т.д. [5].

В начале 50-х гг. XX в. критерий «уровень обслуживания» LOS был применен для оценки качества функционирования автомобильных дорог. Позднее в руководствах Highway Capacity Manual 2000 [6] и 2010 [7] (HCM 2000, 2010) уровень обслуживания стал критерием оценки всех элементов транспортной инфраструктуры (перегоны улиц, все виды перекрестков, развязки в разных уровнях, пешеходные переходы, тротуары, велосипедные дорожки и т.д.) (табл. 1) [8–11]. Затем этот критерий был использован для оценки качества функционирования городского пассажирского транспорта (руководство Transit Capacity and Quality of Service Manual) [12].

Отдельным объектом исследования в транспортной инфраструктуре в области изучения уровня обслуживания стали терминалы воздушного сообщения – аэропорты [13–16]. В марте 2014 г. Международная ассоциация воздушного транспорта The International Air Transport Association (IATA) [14] совместно с Международным советом аэропортов Airports Council International (ACI) и другими заинтересованными участниками авиационной отрасли выпустили 10-е издание справочного руководства развития аэропортов «Airport Development Reference Manual» (ADRM) (Руководство ADRM 2016).

Согласно тезисам, оформленным IATA и ACI (Тезисы) [13], 10-е издание Руководства ADRM содержит доработки в главах, в том числе в разделах, имеющих информацию об уровне обслуживания пассажиров в терминалах. В нем отмечено, что уровень обслуживания является основным показателем как для проектирования новых аэровоздушных интермодальных терминалов, так и для определения уровня качества ключевых показателей действующих аэропортов.

Концепция предшествующего Руководства ADRM 2004 основывалась на определении минимально допустимых показателей пространства, приходящегося на каждого пассажира в различных зонах аэропорта (так называемые подсистемы аэропорта). То есть, показатели уровня обслуживания варьировались в зависимости от зоны оказания услуг – показатели площади LOS зоны паспортного контроля отличались от показателя в зоне регистрации

Теоретическое обоснование шкалы уровней обслуживания интермодальных узлов...

Таблица 2. Градация уровней обслуживания (Руководство ADRM 2004)

Показатель	A	B	C	D	E
<i>Для очереди в один ряд в зоне регистрации, м²</i>					
Несколько пассажиров с тележками и несколько пассажиров с ручной кладью (ширина ряда 1,2 м)	1,7	1,4	1,2	1,1	0,9
Несколько пассажиров с тележками и 1 или 2 пассажира с багажом (ширина ряда 1,2 м)	1,8	1,5	1,3	1,2	1,1
Высокий процент пассажиров с тележками (ширина ряда 1,4 м)	2,3	1,9	1,7	1,6	1,5
Габаритный багаж, 2 ед. и более на пассажира и высокий процент пассажиров с тележками (ширина ряда 1,4 м)	2,6	2,3	2,0	1,9	1,8
<i>Для очереди в один ряд в зоне паспортного контроля, м²</i>					
Паспортный контроль	1,4	1,2	1,0	0,8	0,6
<i>В зоне досмотра багажа</i>					
Стандарты пространства	2,6	2,0	1,7	1,3	1,0

(табл. 2). На основании значений площадей в различных зонах обслуживания авиатерминалов в Руководстве ADRM 2004 сформирована классификация уровней обслуживания A–F.

В зависимости от выбранного индикатора уровня обслуживания условия оказания услуг в терминале были классифицированы следующим образом:

- A – Превосходный уровень обслуживания. Свободный поток пассажиров. Помех движению нет, очень комфортно;
- B – Высокий уровень обслуживания. Стабильный поток пассажиров. Незначительные помехи движению, высокий уровень комфорта;
- C – Хороший уровень обслуживания. Стабильный поток пассажиров. Увеличение помех движению, хороший уровень обслуживания;
- D – Удовлетворительный уровень обслуживания. Нестабильный поток пассажиров. Помехи движению на короткий период времени, приемлемый уровень комфорта;
- E – Недостаточный уровень обслуживания. Нестабильный поток пассажиров. Неприемлемый уровень комфорта;
- F – Недопустимый уровень обслуживания. Пересечение потоков, стабильные помехи движению. Недопустимый уровень комфорта.

В тезисах [13] отмечается, что в Руководстве ADRM 2016 уровень обслуживания терминалов был пересмотрен с учетом следующих составляющих:

- динамика движения в терминалах и пропускная способность;
- повышение эффективности инфраструктуры.

Также обозначены два основных критерия LOS в процессе обслуживания пассажиров в различных зонах терминала – это пространство, приходящееся на пользователя терминала, и максимальное время его ожидания в процессе обслуживания. Соответственно новая градация уровней обслуживания получила следующее описание:

1. Under-provided – недостаточность/необходимость в модернизации;
2. Sub-optimum – условия близки к оптимуму/необходимость в улучшении;

Таблица 3. Концепция нового уровня обслуживания, обозначенная в тезисах [13] (Руководство ADRM 2016)

		Пространство		
		Сверхнорма	Оптимум	Условия близки к оптимуму
		лишнее или пустое пространство	достаточное пространство для размещения необходимых функций и обеспечение комфортных условий	переполненность/ неудобство
Максимальное время ожидания	Сверхнорма	Сверхнорма	Оптимум	Условия близки к оптимуму. Необходимость в улучшении
	Оптимум	Допустимые продолжительность обслуживания и время ожидания	Оптимум	Условия близки к оптимуму. Необходимость в улучшении
	Недопустимые продолжительность обслуживания и время ожидания	Условия близки к оптимуму Необходимость в улучшении	Условия близки к оптимуму Необходимость в улучшении	Недостаточность. Необходимость в перепроектировании

3. Optimum – оптимум;
4. Overdesign – необходимость в перепрофилировании.

Таким образом, в Руководстве ADRM 2016 сформирована концепция нового уровня обслуживания, основанная не только на показателях пространства, приходящегося на пассажира в квадратных метрах, но и на показателях максимального времени ожидания (табл. 3). Основная цель новой концепции состоит в предоставлении пассажирам оптимальных условий, избегая при этом недостаточности или излишества в процессе оказания услуг. Для наглядности отличий оформлена табл. 4 сопоставительного анализа концепции уровней обслуживания в Руководствах ADRM 2004 и 2016.

Термин «оптимальный» описывается следующим образом:

- наличие достаточного пространства для размещения необходимых функций в комфортных условиях;
- обеспечение стабильных пассажирских потоков с комфорtnым временем ожидания при оказании услуг;

Таблица 4. Сопоставительный анализ концепций уровней обслуживания, принятый в Руководствах ADRM 2004 и 2016 и обозначенный в тезисах [13]

Показатель	Концепция уровня обслуживания	
	Руководство ADRM 2004	Руководство ADRM 2016
Уровень обслуживания	<ul style="list-style-type: none"> • A (Превосходный) • B (Высокий) • C (Хороший) • D (Удовлетворительный) • E (Недостаточный) • F (Недопустимый) 	<ul style="list-style-type: none"> • Under-provided – Недостаточность/необходимость в модернизации • Sub-optimum – Условия близки к оптимуму/необходимость в улучшении • Optimum – Оптимум • Overdesign – Необходимость в перепроектировании
Основные критерии	<p>Уровень обслуживания основывается только на показателях пространства (m^2), приходящегося на пассажира</p> <p>Время ожидания упоминается, однако прямой связи с уровнем обслуживания нет</p>	<p>Уровень обслуживания основывается:</p> <ul style="list-style-type: none"> • на показателе пространства, приходящегося на пассажира (m^2) • максимальном времени ожидания
Рациональность	<p>Главная цель – предоставлять пассажирам уровень обслуживания категории A. Это имело следующие последствия:</p> <ul style="list-style-type: none"> • неоправданные габариты здания • неэффективно используемая и дорогостоящая инфраструктура 	<p>Главная цель – предоставление оптимальных услуг:</p> <ul style="list-style-type: none"> • наличие пространства, достаточного для предоставления функций в комфортных условиях • комфортное время ожидания

- гарантирование общего уровня комфорта для пассажиров, при этом сохраняются оптимальные эксплуатационные расходы;
- достижение баланса между ценой и ожидаемым качеством предоставляемых услуг для пассажиров.

Представляется, что методики, разработанные для авиационных терминалов, могут быть использованы для оценки эффективности функционирования интермодальных узлов. Однако интермодальные транспортные узлы ГОПТ не входят в перечень элементов транспортной инфраструктуры, к которым применяется критерий уровень обслуживания.

Транспортно-пересадочный узел (ТПУ) является одним из основных элементов в городской транспортной системе и точкой притяжения разнообразной инфраструктуры, в которой взаимодействуют различные пассажирские виды транспорта. Правильно расположенный ТПУ – это основа эффективной работы городской пассажирской транспортной сети, которая, в свою очередь, имеет огромную комплексную систему, играющую важную роль в жизни города.

На основе материалов и современной литературы [17–21], посвященных изучению уровня обслуживания транспортной инфраструктуры, улично-дорожной сети и терминалов воздушного транспорта в работе сформулирована концепция уровня обслуживания пользователей интермодального пассажирского узла, которая заключается в следующем.

Уровень обслуживания пользователей интермодального пассажирского узла предлагается оценивать, используя показатель T – полные затраты времени на пересадку (с), которые являются суммой затрат времени на передви-

жение от места высадки к месту посадки t_p (с) и времени ожидания транспорта, на который осуществляется пересадка t_w (с)

$$T = t_p + t_w. \quad (1)$$

Продолжительность передвижения при пересадке определяется с учетом меняющейся загруженности узла пешеходными потоками (см. табл. 1)

$$t_p = \sum_1^n \frac{L_i}{v_i}, \quad (2)$$

где L_i – протяженность элемента i (коридора, лестницы, пандуса), м;
 v_i – скорость движения пешеходного потока в зависимости от его плотности;
 n – количество элементов на пути следования при совершении пересадки.

Продолжительность ожидания при пересадке t_w вычисляется в случае: фиксированного расписания

$$t_w = \frac{\tau}{2}, \quad (3)$$

отклонений от среднего значения интервала (уличный транспорт: трамвай, троллейбус, автобус)

$$t_w = \tau_{85\%} = \bar{\tau} C_v Z, \quad (4)$$

где τ – продолжительность маршрутного интервала при фиксированном расписании, с;

$\tau_{85\%}$ – продолжительность маршрутного интервала 85 % обеспеченности, с;
 $\bar{\tau}$ – средний интервал на маршруте, с;

C_v – коэффициент вариации интервала на маршруте;

Z – нормированное отклонение, соответствующее 85 % квантилю нормального нормированного распределения.

Значения $\bar{\tau}$ и C_v устанавливаются натурными обследованиями или назначаются.

Оценочную шкалу уровней обслуживания ($A-D$) предлагается сформировать на основе оценки полных затрат времени на пересадку T_f , осуществляемую в свободных условиях пешеходного движения в пересадочном узле (т. е. при уровне обслуживания A , см. табл. 1) и фиксированном расписании:

$$T_f = \sum_1^n \frac{L_i}{v_{if}} + \frac{\tau}{2}, \quad (5)$$

где v_{if} – скорость движения пешеходного потока на элементе i в свободных условиях;

n – количество элементов на пути следования при совершении пересадки.

Сами границы уровней обслуживания предложено установить на основе значений квантилей распределения значений общей продолжительности пересадки, определенных по результатам обследований интермодальных узлов г. Вены. Выбор Вены обусловлен тем, что город обладает большим разнообразием интермодальных узлов, в которых взаимодействуют разные виды транспорта:

- внеуличные: S Bahn (пригородная железная дорога), U-Bahn (метро);
- уличные: трамвай, автобус;

Теоретическое обоснование шкалы уровней обслуживания интермодальных узлов...

Таблица 5. Предлагаемая градация уровней обслуживания на основе данных обследований интермодальных узлов ГОПТ г. Вены

Уровень обслуживания	Качество обслуживание – условия пересадки	Затраты времени на пересадку, с / мин		
		уличный – уличный	внеуличный – уличный; внеуличный – внеуличный	все виды пересадок
A	Превосходные условия пересадки Свободный поток пересаживающихся пассажиров Помех движению нет, высокая степень комфорта	$t \leq 320$ $t \leq 5:20$	$t \leq 370$ $t \leq 6:10$	$t \leq 340$ $t \leq 5:40$
B	Хорошие условия пересадки Стабильный поток пересаживающихся пассажиров Увеличение помех движению, достаточная степень комфорта	$320 < t \leq 390$ $5:20 < t \leq 6:30$	$370 < t \leq 510$ $6:10 < t \leq 8:30$	$340 < t \leq 450$ $5:40 < t \leq 7:30$
C	Удовлетворительные условия пересадки Нестабильный поток пересаживающихся пассажиров Помехи движению на короткий период времени, приемлемая степень комфорта	$390 < t \leq 450$ $6:30 < t \leq 7:30$	$510 < t \leq 1020$ $8:30 < t \leq 17:0$	$450 < t \leq 990$ $7:30 < t \leq 16:30$
D	Недостаточные/плохие условия пересадки Нестабильный поток пересаживающихся пассажиров Низкая степень комфорта	$t > 450$ $t > 7:30$	$t > 1020$ $t > 17:0$	$t > 990$ $t > 16:30$

сочетающие разные комбинации пересадок:

- внеуличный – внеуличный;
- внеуличный – уличный;
- уличный – уличный.

По результатам исследования описаны уровни обслуживания (табл. 5).

Дальнейшее исследование предусматривает апробацию предлагаемой оценочной шкалы уровней обслуживания на примере оценки качества функционирования целого ряда ТПУ Иркутска и Москвы и последующую разработку практических рекомендаций по оценке качества функционирования интермодальных узлов ГОПТ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Власов Д.Н., Данилина Н.В. Современное состояние и перспективы развития системы перехватывающих парковок в московской агломерации // Градостроительство. 2014. № 4. С. 36–39.
2. Власов Д.Н. Структура системы транспортно-пересадочных узлов агломерации // Градостроительство. 2013. № 2. С. 84–88.
3. Власов Д.Н. Принципы застройки, ориентированные на массовые виды транспорта, в планировании зарубежных пересадочных узлов // Архитектура и строительство России. 2015. № 8. С. 20–29.

4. Солодянкина С.В., Пуляевская Е.В. Методика применения инструментов ландшафтного планирования в градостроительстве // Вестн. ИрГТУ. 2013. № 10. С. 182–185.
5. Михайлов А.Ю., Головных И.М. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожной сети городов: моногр. Новосибирск: Наука, 2004. 267 с.
6. Highway Capacity Manual 2000 (HCM 2000): Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C., 2000. 1207 p.
7. Highway Capacity Manual 2010 (HCM 2010): Transportation Research. Available: Boardhttp://hcm.trb.org/?qr=1.
8. Михайлов А.Ю., Шаров М.И. К вопросу о современных критериях оценки качества организации дорожного движения и функционирования городского пассажирского транспорта // Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства. Красноярск, 2016. С. 522–528.
9. Копылова Т.А., Михайлов А.Ю. Разработка оценочной шкалы затрат времени на пересадку // Социально-экономические проблемы развития и функционирования транспортных систем городов и зон их влияния: Материалы 22-й Междунар. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2016. С. 352–357.
10. Копылова Т.А., Михайлов А.Ю. Оценка функционирования интермодальных узлов городского пассажирского транспорта // Транспортные системы Сибири. Развитие транспортной системы как катализатор роста экономики государства: Сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. Красноярск, 2016. С. 528–532.
11. Копылова Т.А., Михайлов А.Ю. Предложения по оценке уровня обслуживания в интермодальном узле городского пассажирского транспорта // Изв. вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2017. Т. 7. № 2. С. 150–154.
12. Transit Capacity and Quality of Service Manual, 3rd Edition. Available: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp_rpt_165ch-04.pdf
13. New Airport Level of Service Concept: International Air Transport Association and Airports Council International World. Canada, 2016. 12 p.
14. Best practice guidelines: airport service level agreement framework. ACI world facilitation and services standing committee. Version 1.0.–20140326, 2005. 34 p.
15. Fernanda D. Weber, Aline C. B. Mancuso, Senna Luiz A. S., Márcia Echeveste E.S. Quality Function Deployment in Airport Terminals: The Airport of Porto Alegre Case // Federal University of Rio Grande do Sul, Industrial and Transportation Engineering Department. Journal of Traffic and Logistics Engineering. Porto Alegre. 2013. Vol. 1, No. 2. 6 p.
16. Sacramento Intermodal Transportation Facility: Final Conceptual Transit and Joint Development Programs. Sacramento: SMWM/Arup and Associated Consultants, 2004. TR # 6. 92 p.
17. Dott. Nicola Desiderio. Requirements of Users and Operators on the Design and Operation of Intermodal Interchanges // Technical University of Darmstadt. Darmstadt, 2001. 33 p.
18. Edwards Brian. Sustainability and the design of transport interchanges: Book. USA, 2011. 194 p.
19. Daamen W. A quantitative assessment on the design of a railway station // Computers in railways VIII Congress Proceedings WIT Press. 2002. P. 191–200.
20. Li-Yao Yao, Xin-Feng Xia, Li-Shan Sun. Transfer Scheme Evaluation Model for a Transportation Hub based on Vectorial Angle Cosine. Sustainability. China, 2014. Vol. 6. P. 4152–4162.
21. Olszewski Piotr, Kruckowski Piotr. Quantitative assessment of public transport interchanges // Warsaw University of Technology. Association for European Transport and Contributors. Warsaw, Poland, 2012. 12 p.

Копылова Татьяна Александровна, специальный корреспондент пресс-службы;
E-mail: kopylovaT.irkutsk@gmail.com
Иркутский национальный исследовательский технический университет

Получено 17.07.17

Kopylova Tatiana Alexandrovna, special correspondent of the press service;
E-mail: kopylovaT.irkutsk@gmail.com
Irkutsk National Research Technical University, Russia

CIENTIFIC JUSTIFICATION OF LEVEL OF SERVICE SCALE OF INTERMODAL PASSENGER TRANSPORT JUNCTION

Transit oriented development is important part in the modern urban planning. This article shows the indicator of the level of service concept for airports and intermodal passenger nodes. Author suggests estimating the level of service of users of intermodal passenger using indicator of total time required to transfer from the one type of public transport to other. It is offered to set the boarders of level of service on the basis of inverse distribution indicators of the whole duration of interchanging that was determined using results of researching of different types of Vienna (Austria) intermodal passenger nodes.

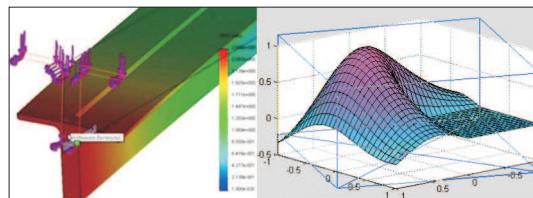
К e y w o r d s: intermodal passenger junction, level of service, air terminal, interchange duration, scale level of service.

REFERENCES

1. Vl asov D.N., Danilina N.V. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya sistemy perekhvativayushchikh parkovok v moskovskoy aglomeratsii [Current state and prospects of the developing Park and Ride system of Moscow agglomeration]. Gradostroitel'stvo [Urban planning]. 2014. No. 4. Pp. 36–39. (in Russian)
2. Vl asov D.N. Struktura sistemy transportno-peresadochnykh uzlov aglomeratsii [The system structure of transport nodes of an agglomeration]. Gradostroitel'stvo [Urban planning]. 2013. No. 2. Pp. 84–88. (in Russian)
3. Vl asov D.N. Printsipy zastroyki, orientirovannye na massovye vidy transporta, v planirovaniyu zarubezhnykh peresadochnykh uzlov [The building concepts that are oriented on passenger types of public transport in the planning of foreign transport nodes]. Arkhitektura i stroitel'stvo Rossii [Architecture and building of Russia]. 2015. No. 8. Pp. 20–29. (in Russian)
4. Solod'yankina S.V., Pulyaeva skaya E.V. Metodika primeneniya instrumentov landshaftnogo planirovaniya v gradostroitel'stve [An apply methods of landscape planning tools in urban planning]. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2013. No. 10. Pp. 182–185. (in Russian)
5. Mikhailov A.Yu., Golovnykh I.M. Sovremennye tendentsii proektirovaniya i rekonstruktsii ulichno-dorozhnoy seti gorodov: monografiya [Current tendencies of project and reconstruction of streets network: monograph]. Novosibirsk, 2004. 267 p. (in Russian)
6. Highway Capacity Manual 2000 (HCM 2000): Transportation Research Board, National Research Council. Washington, D.C., 2000. 1207 p.
7. Highway Capacity Manual 2010 (HCM 2010): Transportation Research. Available: Boardhttp://hcm.trb.org//qr=1.

8. M i k h a i l o v A.Yu., S h a r o v M.I. K voprosu o sovremennykh kriteriyakh otsenki kachestva organizatsii dorozhnogo dvizheniya i funktsionirovaniya gorodskogo passazhirskogo transporta [To question about current indicators of quality assessment of traffic management and function of public transport]. Transportnye sistemy Sibiri. Razvitie transportnoy sistemy kak katalizator rosta ekonomiki gosudarstva [Transport systems in Siberia. Development of transport system as accelerator of growth of economics of the state]. Krasnoyarsk, 2016. Pp. 522–528. (in Russian)
9. K o p y l o v a T.A., M i k h a i l o v A.Yu. Razrabotka otsenochnoy shkaly zatrata vremeni na peresadku [Development of evaluation scale of costs of time required to transfer]. Sotsial'no-ekonomicheskie problemy razvitiya i funktsionirovaniya transportnykh sistem gorodov i zon ikh vliyaniya: materialy XXII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Social and economical problems of development and functioning of transport systems of cities and zones of their impact: materials of XXII International scientific and practical conference]. Ekaterinburg, 2016. Pp. 352–357. (in Russian)
10. K o p y l o v a T.A., M i k h a i l o v A.Yu. Otsenka funktsionirovaniya intermodal'nykh uzlov gorodskogo passazhirskogo transporta [Evaluation of functioning of intermodal nodes of urban passenger transport]. Transportnye sistemy Sibiri. Razvitie transportnoy sistemy kak katalizator rosta ekonomiki gosudarstva: sb. nauch. trudov Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. [Transport systems in Siberia. Development of transport system as accelerator of growth of economics of the state: collection of studies of International scientific and practical conference]. Krasnoyarsk, 2016. Pp. 528–532. (in Russian)
11. K o p y l o v a T.A., M i k h a i l o v A.Yu. Predlozheniya po otsenke urovnya obsluzhivaniya v intermodal'nom uzel gorodskogo passazhirskogo transporta [The suggestion for estimation of level of service of intermodal transport node]. Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' [Proceedings of Universities. Investments. Construction. Real estate]. 2017. Vol. 7, No. 2. Pp. 150–154. (in Russian)
12. Transit Capacity and Quality of Service Manual, 3rd Edition. Available: http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp_rpt_165ch-04.pdf
13. New Airport Level of Service Concept: International Air Transport Association and Airports Council International World. Canada, 2016. 12 p.
14. Best practice guidelines: airport service level agreement framework. ACI world facilitation and services standing committee. Version 1.0.–20140326, 2005. 34 p.
15. Fernanda D. Weber, Alinne C. B. Mancuso, Senna Luiz A.S., Márcia Echeveste E.S. Quality Function Deployment in Airport Terminals: The Airport of Porto Alegre Case. Federal University of Rio Grande do Sul, Industrial and Transportation Engineering Department. Journal of Traffic and Logistics Engineering. Porto Alegre. 2013. Vol. 1, No. 2. 6 p.
16. Sacramento Intermodal Transportation Facility: Final Conceptual Transit and Joint Development Programs. Sacramento: SMWM/Arup and Associated Consultants, 2004. TR # 6. 92 p.
17. Dott. Nicola Desiderio. Requirements of Users and Operators on the Design and Operation of Intermodal Interchanges. Technical University of Darmstadt. Darmstadt, 2001. 33 p.
18. Edwards Brian. Sustainability and the design of transport interchanges: Book. USA, 2011. 194 p.
19. Daamen W. A quantitative assessment on the design of a railway station. Computers in railways VIII Congress Proceedings WIT Press. 2002. Pp. 191–200.
20. Li-Ya Yao, Xin-Feng Xia, Li-Shan Sun. Transfer Scheme Evaluation Model for a Transportation Hub based on Vectorial Angle Cosine. Sustainability. China, 2014. Vol. 6. Pp. 4152–4162.
21. Olszewski Piotr, Kruckowski Piotr. Quantitative assessment of public transport interchanges. Warsaw University of Technology. Association for European Transport and Contributors. Warsaw, Poland, 2012. 12 p.

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ



УДК 624.131

К.В. КОРОЛЕВ, А.М. КАРАУЛОВ, Д.С. ГАЛТЕР

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕРТИКАЛЬНО АРМИРОВАННЫХ ОСНОВАНИЙ

В статье предлагается вариант инженерной методики расчета в рамках общей теории вертикально армированных грунтовых массивов В.Г. Федоровского. Эффект армирования выражается в снижении деформируемости грунта за счет сил трения, развивающихся по боковой поверхности армоэлемента. Это явление описывается для отдельной ячейки армированного поля в осесимметричной системе координат. Соответственно, применение получаемых методик расчета ограничивается армированными полями значительных размеров. В данной работе характеристики контактного взаимодействия армоэлемента и грунта рассчитываются в зависимости от параметров деформируемости грунта. Подобная связь позволяет определять контактное взаимодействие на основе стандартных характеристик прочности и деформируемости грунта.

Ключевые слова: вертикальное армирование, армоэлемент, основание, дополнительные напряжения, бытовые напряжения, коэффициент трения, осадка.

Метод усиления грунтовых оснований вертикальными армирующими стержнями (свяями, микросвяями и т.д.) находит все более широкое применение в современном строительстве. Теория расчета таких оснований сформулирована в работе В.Г. Федоровского и С.Г. Безволева [1], где была разработана концепция расчета, даны определяющие уравнения и получено решение задачи в общем виде. Дальнейшее развитие эта проблема получила в трудах [2–7] и др. В настоящей работе предлагается вариант инженерной методики расчета в рамках общей теории вертикально армированных грунтовых массивов В.Г. Федоровского.

На рис. 1 показана схема ячейки основания, армированного жесткими вертикальными элементами, в условиях одномерной задачи. Здесь приняты следующие обозначения:

p_f – напряжения по подошве фундамента;

σ , σ_g и σ_p – вертикальные полные, природные и дополнительные напряжения в грунте;

p_0 и p_l – контактные напряжения по верхнему и нижнему торцам армоэлемента;

σ_0 и σ_l – напряжения в грунте в уровнях верха и низа армоэлемента;

h – толщина грунтовой подушки;

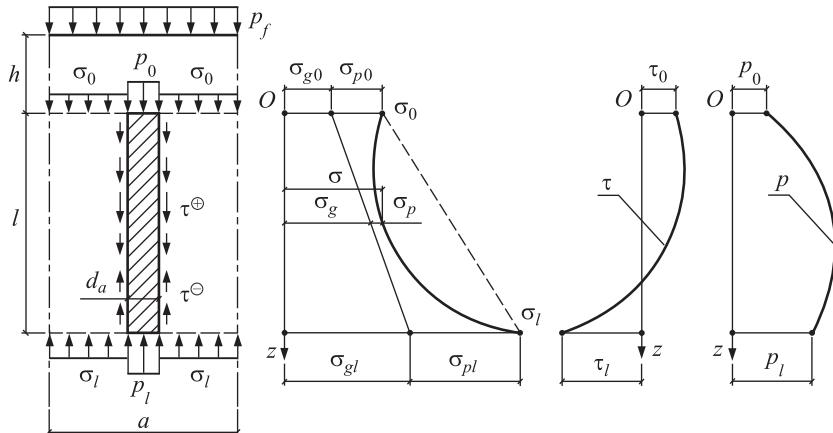


Рис. 1. Расчетная схема ячейки армированного поля и схема напряженного состояния

τ – касательные напряжения на контакте «армоэлемент–грунт»; p – напряжения в армоэлементе

l – длина армоэлемента;

d_a – диаметр армоэлемента;

a – размер квадратной ячейки армированного поля (шаг армоэлементов по осям).

Для характеристик грунтов примем следующие обозначения: γ , c , ϕ , E , v – удельный вес, удельное сцепление, угол внутреннего трения, модуль деформации и коэффициент Пуассона грунта по длине армоэлемента; γ_0 , c_0 , Φ_0 , E_0 – то же для грунта подушки; γ_l , c_l , ϕ_l , E_l – то же для грунта, залегающего ниже армоэлемента. Обозначим также: $A_a = \pi d_a^2/4$ – площадь поперечного сечения армоэлемента; $A_{tot} = a^2$ – площадь ячейки; $A = (A_{tot} - A_a)$ – часть площади ячейки, занимаемая грунтом.

Пренебрегая изменением напряженно-деформированного состояния (НДС) грунта, которое возникает в процессе изготовления (погружения) армоэлементов, начальные напряжения в грунте в уровнях верха и низа армоэлемента, т.е. до момента приложения давления p_f по подошве, равны:

$$\sigma_{g0} = \gamma_0 h, \quad \sigma_{gl} = \sigma_{g0} + \gamma l, \quad p_0 = \sigma_{g0}, \quad p_l = \sigma_{gl},$$

а после –

$$\sigma_0 = \sigma_{g0} + \sigma_{p0}, \quad \sigma_l = \sigma_{gl} + \sigma_{pl}, \quad p_0 = \sigma_{g0} + \Delta p_0, \quad p_l = \sigma_{gl} + \Delta p_l.$$

Для нахождения приращений напряжений σ_{p0} , σ_{pl} , Δp_0 , Δp_l и соответственно величин σ_0 , σ_l , p_0 , p_l следует решить принципиальный вопрос о характере НДС грунта по торцам армоэлемента.

Основной эффект армирования состоит в том, что грунтовый массив в пределах длины l разгружается в результате передачи части усилий на армоэлемент. Это происходит за счет трения, которое возникает по боковой поверхности армоэлемента. Величина трения тем больше, чем больше смещение грунта относительно армоэлемента в данном сечении. Следовательно, максимальный эффект армирования может быть достигнут, когда армоэлемент «протыкает» выше- и нижележащие грунты, и грунт по боковой

поверхности армоэлемента наилучшим образом включается в работу. В противном случае ресурсы системы «армоэлемент–грунт» используются недостаточно. Заметим, что в отличие от свайных фундаментов, где подобное «протыкание» сваей нижележащих слоев грунта означает исчерпание несущей способности, здесь возникновение такого эффекта становится даже желательным.

Из вышеизложенного следует, что по торцам армоэлемента грунт может достигать предельного состояния, которое опишем с помощью решений осесимметричной задачи теории предельного равновесия грунтов (ТПРГ) [5]. Совместное решение статических уравнений равновесия и физических уравнений ТПРГ даст искомые значения напряжений σ_0 , σ_l , p_0 , p_l .

В уровне верха армоэлемента условие равновесия имеет вид

$$G_0 = p_0 A_a + \sigma_0 A, \quad (1)$$

где $G_0 = (p_f + \gamma_0 h)A_{tot}$.

Физическое уравнение, которое связывает напряжения p_0 и σ_0 в предельном состоянии, запишем как [5]

$$p_0 = \gamma_0 d_a N_{\gamma 0} + \sigma_0 N_{q 0} + c_0 N_{c 0}, \quad (2)$$

где $N_{\gamma 0}$, $N_{q 0}$, $N_{c 0}$ – коэффициенты несущей способности:

$$N_{\gamma 0} = -0,5 e^{10,811\phi_0 - 2,24219}, \quad N_{q 0} = e^{6,444\phi_0 - 0,01874}, \quad N_{c 0} = (N_{q 0} - 1) \operatorname{ctg}\phi_0.$$

Совместное решение уравнений (1) и (2) дает выражения для напряжений в грунте на уровне верха армоэлемента:

$$\sigma_0 = \frac{G_0 - (\gamma_0 d_a N_{\gamma 0} + c_0 N_{c 0}) A_a}{A_a N_{q 0} + A}, \quad p_0 = \gamma_0 d_a N_{\gamma 0} + \sigma_0 N_{q 0} + c_0 N_{c 0}. \quad (3)$$

Отметим, что если σ_0 окажется меньше σ_{g0} , то это исключит возможность наступления предельного состояния в данном сечении, и в этом случае рекомендуется увеличить шаг армирования.

Аналогичным образом опишем работу грунта под низом армоэлемента. В уровне низа армоэлемента условие равновесия имеет вид

$$G_0 + G_a + G = p_l A_a + \sigma_l A, \quad (4)$$

где $G_a = \gamma_a l A_a$ – вес армоэлемента (γ_a – удельный вес материала армоэлемента);

$G = \gamma l A$ – вес объема грунта по длине армоэлемента.

Предельное силовое взаимодействие грунта и нижнего торца армоэлемента описывается соответствующим осесимметричным решением ТПРГ

$$p_l = \gamma_l d_a N_{\gamma l} + \sigma_l N_{q l} + c_l N_{c l}, \quad (5)$$

где $N_{\gamma l}$, $N_{q l}$, $N_{c l}$ – коэффициенты несущей способности:

$$N_{\gamma l} = 0,5 e^{10,811\phi_l - 2,24219}, \quad N_{q l} = e^{6,444\phi_l - 0,01874}, \quad N_{c l} = (N_{q l} - 1) \operatorname{ctg}\phi_l.$$

Совместное решение системы уравнений (4) и (5) даст:

$$\sigma_l = \frac{G_0 + G_a + G - (\gamma_l d_a N_{\gamma l} + c_l N_{c l}) A_a}{A + N_{q l} A_a}, \quad p_l = \gamma_l d_a N_{\gamma l} + \sigma_l N_{q l} + c_l N_{c l}. \quad (6)$$

Если рассчитанное по формуле (6) напряжение σ_l окажется меньше, чем природное давление σ_{gl}

$$\sigma_l < \sigma_{gl} = \gamma_0 h + \gamma l,$$

то это означает, что для принятой длины армоматериала наступление предельного состояния в основании под низом армоматериала невозможно. Тогда для более полного включения в работу армоматериала рекомендуется уменьшить его длину или увеличить шаг сетки армирования.

Полученные в рамках принятых гипотез значения напряжений σ_{g0} , σ_{gl} , σ_0 , σ_l представляют собой, по сути, граничные условия для решения задачи о НДС грунта по длине армирующего стержня (см. рис. 1).

Ясно, что напряжения σ в грунте при $0 < z < l$ должны удовлетворять условию

$$\frac{z}{l}(\sigma_{gl} - \sigma_{g0}) + \sigma_{g0} < \sigma(z) < \frac{z}{l}(\sigma_l - \sigma_0) + \sigma_0.$$

При этом на границах $z = 0$ и $z = l$ должны выполняться равенства:

$$\sigma(0) = \sigma_0, \quad \sigma(l) = \sigma_l$$

или в дополнительных напряжениях:

$$\sigma_p = \sigma_0 - \sigma_{g0}, \quad \sigma_{pl} = \sigma_l - \sigma_{gl}. \quad (7)$$

Вогнутый вид эпюры σ_p и соответственно σ (см. рис. 1) связан с разгрузкой основания, осуществляющейся за счет трения по боковой поверхности армоматериалов, которые тем самым воспринимают на себя часть внешнего давления. Таким образом, далее главной задачей будет нахождение функции $\sigma_p(z)$.

Определение напряжений σ_p будем выполнять в рамках одномерной задачи деформирования грунтового основания, армированного жесткими вертикальными стержнями. Уравнение равновесия в дополнительных напряжениях в этом случае имеет вид [1]

$$\frac{u}{A}\tau = -\frac{d\sigma_p}{dz}, \quad (8)$$

где $u = \pi d_a$ – периметр поперечного сечения армоматериала.

Следуя концепции, разработанной в [1], примем, что трение грунта по армоматериалу в данной точке зависит от разности перемещений грунта w_s и армоматериала w_a (рис. 2, а)

$$w = w_s - w_a.$$

При небольших значениях w эта зависимость, напомним, принималась линейной

$$\tau = kw,$$

а при достижении величиной w некоторого критического значения на контакте «армоматер质–грунт» реализуется закон трения (рис. 2, б)

$$\tau = \tau_u = \psi \sigma_x = \psi \xi (\sigma_p + \gamma z + \sigma_{g0}).$$

Здесь k – экспериментальный коэффициент;

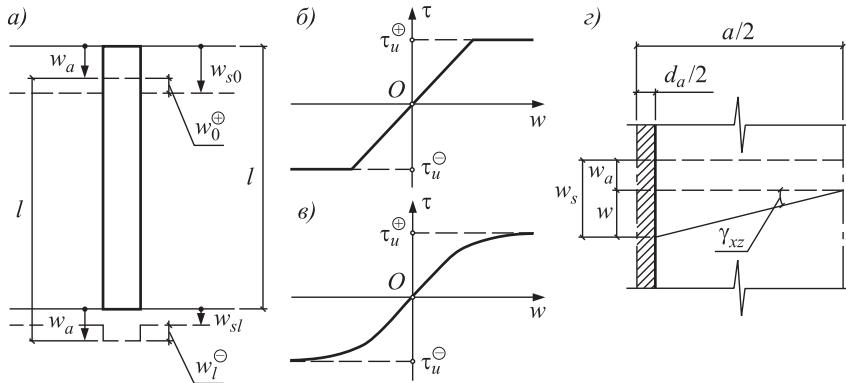


Рис. 2. Взаимные перемещения w грунта и армоэлемента (а), кусочно-линейная (б) и гладкая (в) функции $\tau(w)$, схема к приближенной оценке параметров функции $\tau(w)$ (г)

ψ – коэффициент трения грунта по армоэлементу, который также следует определять в опыте, но для многих практических случаев допустимо принять $\psi = \operatorname{tg}\varphi$;

ξ – коэффициент бокового давления;

σ_x – полное боковое давление грунта на армоэлемент.

В данной работе предлагается кусочно-линейную зависимость $\tau(w)$ с известной степенью приближения описать одной функцией, например (рис. 2, б)

$$\tau(w) = \frac{2\tau_u}{\pi} \operatorname{arctg}(G_k w) = \frac{2}{\pi} \psi \xi (\sigma_p + \gamma z + \sigma_{g0}) \operatorname{arctg}(G_k w), \quad (9)$$

где G_k – параметр деформируемости грунта на контакте с армоэлементом.

Параметр G_k следует определять опытным путем, однако для практических целей предлагается оценивать его с помощью следующего приближенного приема. В нарушение принятых выше условий одномерной задачи деформированный вид грунта в пределах ячейки армированного поля примем таким, как показано на рис. 2, г. Отсюда:

$$\gamma_{xz} = \frac{1+\nu}{E} 2\tau = \frac{w}{(a-d_a)/2}, \quad \frac{\tau}{w} = \frac{E}{(1+\nu)(a-d_a)}.$$

В то же время, из уравнения (9) следует, что искомый параметр характеризует начальный момент деформирования системы «армоэлемент–грунт»

$$\left. \frac{d\tau}{dw} \right|_{w=0} = \frac{2\tau_u}{\pi} \frac{G_k}{1+(G_k \cdot 0)^2} = \frac{2\tau_u G_k}{\pi}.$$

Приравняв полученные выражения, имеем

$$G_k = \frac{\pi E}{2\tau_u (a-d_a)(1+\nu)}.$$

Поскольку предельные касательные напряжения τ_u армоэлемента по грунту меняются с глубиной, в силу принятых допущений параметр G_k также можно рассматривать как функцию глубины z

$$G_k(z) = \frac{\pi E}{2\psi\xi(\sigma_{g0} + \gamma z)(a - d_a)(1+\nu)}. \quad (10)$$

Итак, подставим (9) в уравнение равновесия (8)

$$\frac{d\sigma_p}{dz} + \frac{u}{A} \frac{2\psi\xi}{\pi} (\sigma_p + \gamma z + \sigma_{g0}) \operatorname{arctg}[G_k(z)w] = 0.$$

В условиях одномерной задачи, если армоматериал несжимаем ($w_a = \text{const}$), напряжения в грунте равны [1]:

$$\sigma_p = -\frac{E}{\beta} \frac{dw_s}{dz} = -\frac{E}{\beta} \frac{dw}{dz}, \quad \beta = 1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}. \quad (11)$$

Тогда основное уравнение деформирования армированного грунта примет вид

$$w'' + \frac{2}{\pi} \frac{u\psi\xi}{EA} [Ew' - \beta(\gamma z + \sigma_{g0})] \operatorname{arctg}[G_k(z)w] = 0. \quad (12)$$

Интегрирование уравнения (12) можно выполнить численным методом [8], например, в ПК MathCAD со следующими граничными условиями согласно (7) и (11):

$$\text{при } z = 0: \quad w(0) = w_0, \quad w'(0) = -\frac{\beta}{E} \sigma_{p0} = -\frac{\beta}{E} (\sigma_0 - \sigma_{g0}),$$

причем w_0 подбирается так, чтобы на границе $z = l$ напряжения равнялись σ_{pl} , т.е. выполнялось требование

$$w'(l) = -\frac{\beta}{E} \sigma_{pl} = -\frac{\beta}{E} (\sigma_l - \sigma_{gl}).$$

Полная осадка армированного основания определяется по формуле

$$s_{tot} = s_0 + s + s_l,$$

где s_0 – осадка грунтовой подушки;

s – осадка грунта в пределах армоматериала;

s_l – осадка грунта, залегающего ниже армоматериала.

Осадка грунтовой подушки может быть рассчитана по формуле

$$s_0 = 0,8 \frac{p_f h}{E_0}.$$

Осадку грунта в пределах армоматериала предлагается вычислять как

$$s = \frac{\beta}{E} \int_0^l \sigma_p dz.$$

Наконец, осадку s_l основания ниже армоматериала можно определить методом послойного суммирования, как для основания условного фундамента с подошвой в уровне низа армоматериалов и давлением по подошве, равным σ_l .

Предлагаемая методика позволяет, используя стандартный набор характеристик грунта, выполнять практические расчеты вертикально армированных оснований с учетом силового взаимодействия грунта и армоматериала по его боковой поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федоровский В.Г., Беволев С.Г. Метод расчета свайных полей и других вертикально армированных грунтовых массивов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1994. № 3. С. 11–15.
2. Исааков А.Л., Григорашенко В.А., Плавских В.Д., Земцова А.Е. Экспериментальные исследования деформирования грунтовых оснований, армированных стержневыми элементами // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1998. № 2. С. 20–21.
3. Улицкий В.М., Шашкин К.Г. Расчет буроинъекционных свай по деформированной схеме // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1998. № 5–6. С. 11–15.
4. Пусков В.И., Алогин Д.Э. Осадка слоя грунта с жестким вертикальным стержневым армированием от сплошной равномерной нагрузки // Основания, фундаменты и строительные материалы транспортных сооружений: Сб. науч. тр. Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 1998. С. 21–27.
5. Карапул А.М. Несущая способность оснований осесимметричных фундаментов. Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2002. 104 с.
6. Мирсаяпов И.Т., Попов А.О. Методика расчета армированных оснований // Вестн. гражд. инженеров. 2009. № 2. С. 124–125.
7. Тер-Мартиросян А.З., Тер-Мартиросян З.Г., Аванесов В.С., Сидоров В.В. Преобразование слабых водонасыщенных грунтов сваями-дренами и их использование в качестве оснований сооружений: Доклад на Герсевановских Чтениях – 2016.
Режим доступа: www.miks.pro/img/file.php?r=45166817&id_file=444
8. Бахвалов Н.С. Численные методы. М.: Наука, 1975. 632 с.

Королев Константин Валерьевич, д-р техн. наук, проф.;

E-mail: korolev_kv@mail.ru

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Карапул Александр Михайлович, д-р техн. наук, проф.; E-mail: karaulov@stu.ru

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Гальтер Дмитрий Сергеевич, доц.; E-mail: galter@mail.ru

Сибирский государственный университет путей сообщения, г. Новосибирск

Получено после доработки 10.08.17

Korolev Konstantin Valerjevich, DSc, Professor; E-mail: korolev_kv@mail.ru

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Karaulov Alexander Mikhailovich, DSc, Professor; E-mail: karaulov@stu.ru

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

Galter Dmitriy Sergeevich, Ass. Professor; E-mail: galter@mail.ru

Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

ENGINEERING DESIGN PROCEDURE OF VERTICALLY REINFORCED BASES

In clause the variant of an engineering design procedure is offered within the framework of the general theory of vertically reinforced earth files of V.G. Fedorovskogo. The effect of reinforcing is expressed in decrease in deformability of a ground due to the forces of friction developing on a lateral surface of reinforcing member. This phenomenon is described for a separate cell of the reinforced field in axial symmetry to system of coordinates. Accordingly, application of received design procedures is limited to the reinforced fields

of the significant sizes. In the given work of the characteristic of contact interaction reinforcing member and a ground are defined depending on parameters of deformability of a ground. Similar communication allows to define contact interaction on the basis of standard characteristics of durability and deformability of a ground.

Keywords: vertical reinforcing, reinforcing member, the basis, additional pressure, household pressure, factor of friction, a deposit.

REFERENCES

1. Fedorovskiy V.G., Bezvolev S.G. Metod rascheta swaynykh poley i drugikh vertikal'no armirovannykh gruntovykh massivov [Method of calculation of pile fields and other vertically reinforced earth files]. Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov [Bases, foundations and soil mechanics]. 1994. No. 3. Pp. 11–15. (in Russian)
2. Isakov A.L., Grigoryashchenko V.A., Plavskikh V.D., Zemtsova A.E. Eksperimental'nye issledovaniya deformirovaniya gruntovykh osnovaniy, armirovannykh sterzhnevymi elementami [Experimental research of deformation of the earth bases reinforced with rod elements]. Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov [Bases, foundations and soil mechanics]. 1998. No. 2. Pp. 20–21. (in Russian)
3. Ulitskiy V.M., Shashkin K.G. Raschet buroin"ektsionnykh svay po deformirovannoy skheme [Calculation of boring injection piles under the deformed circuit]. Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov [Bases, foundations and soil mechanics]. 1998. No. 5–6. Pp. 11–15. (in Russian)
4. Puskov V.I., Ablogin D.E. Osadka sloya grunta s zhestkim vertikal'nym sterzhnevym armirovaniem ot sploshnoy ravnomernoy nagruzki [Deposit of a layer of a ground with rigid vertical rod reinforcing from continuous uniform loading]. Osnovaniya, fundamenti i stroitel'nye materialy transportnykh sooruzheniy [The Bases, the bases and building materials of transport constructions]. Novosibirsk, 1998. Pp. 21–27. (in Russian)
5. Karapulov A.M. Nesushchaya sposobnost' osnovaniy osesimmetrichnykh fundamentov [B's sentries ability of the bases symmetry of axis the bases]. Novosibirsk, 2002. 104 p. (in Russian)
6. Mirsayapov I.T., Popov A.O. Metodika rascheta armirovannykh osnovaniy [Design procedure's Priests of the reinforced bases]. Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Bulletin of civil engineers]. 2009. No. 2. Pp. 124–125. (in Russian)
7. Ter-Martirosyan A.Z., Ter-Martirosyan Z.G., Avanesov V.S., Sidorchuk V.V. Preobrazovanie slabikh vodonasyshchennykh gruntov svayami-drenami i ikh ispol'zovanie v kachestve osnovaniy sooruzheniy [Transformation weak water-saturated piles - drains and their use as the bases of constructions: the Report on Gersevanov's Readings. 2016].
URL: www.miks.pro/img/file.php?r=45166817&id_file=444 (in Russian)
8. Bahvalov N.S. Chislennye metody [Numerical's boosters methods]. Moscow, 1975. 632 p. (in Russian)

УДК 711:625.712

Е.С. ПРЕЛОВСКАЯ, А.Г. ЛЕВАШЕВ, А.Ю. МИХАЙЛОВ, М. КЛАМЕР

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УЛИЧНО-ДОРОЖНЫХ СЕТЕЙ РОССИЙСКИХ ГОРОДОВ

В статье представлены результаты комплексного исследования, направленного на разработку методики проектирования городских улиц, позволяющей подобрать варианты поперечных профилей улицы с учетом характеристик городской среды, с целью обеспечения сбалансированности между формируемой типом застройки структуры мобильности и сетью проектируемых улиц. В методике, базирующейся на контекстуальном подходе к проектированию уличного пространства, используется метод кластерного анализа для уточнения типа застройки и ее характеристик, с последующей рекомендацией целевой структуры городской мобильности. В результате апробации предложенной методики проектирования с помощью методов транспортного моделирования оценено влияние мероприятий по реформированию улично-дорожных сетей на изменение транспортного спроса на примере участка центральной части г. Иркутска. Перераспределение транспортных потоков свидетельствует о снижении транспортной нагрузки на исследуемой территории в пользу устойчивых способов передвижений.

Ключевые слова: транспортное планирование, классификация городских улиц, проектирование уличного пространства, кластерный анализ, транспортное моделирование.

Современный ритм развития российских городов, с сопутствующим ростом уровня автомобилизации, выдвигает новые требования к обеспечению городской мобильности с точки зрения энергоэффективности, экологичности, повышению безопасности и комфорта передвижений. Существующие в России классификация и нормы проектирования городских улиц базируются большей частью на технических характеристиках уличного пространства, не взаимосвязаны с характером типа городской среды и не способствуют развитию устойчивой транспортной системы. Таким образом, в настоящее время крайне актуальна задача разработки методики проектирования городских улиц как мультимодальных коммуникаций и общественных пространств.

При проектировании улиц следует учитывать градостроительный контекст, в частности, тип и концентрацию объектов тяготения, так как данные факторы влияют на характер использования уличного пространства и определяют особенности формирования структуры городской мобильности (количественная структура способов передвижений) [1]. Кроме средообразующих характеристик территории методика проектирования должна учитывать технические характеристики уличного пространства, иерархию способов передвижений. С учетом перечисленных критериев предложена методика проектирования городских улиц, базирующаяся на определении значимости функций улицы в городской среде, как общественного пространства (функция «места») и мультимодальной коммуникации (функция «передвижения»),

состоящая из трех этапов: анализ, разработка и оценка концепции проекта сети городских улиц (рис. 1). В рамках настоящего исследования предлагается использовать обобщенную классификацию городских улиц на основе матрицы функций «передвижения и места» [2–7].

Этап 1. Анализ. Анализ существующего и перспективного транспортно-градостроительного развития территории – определение типа градостроительного контекста, соответствующих ему набора классов улиц и целевой структуры мобильности. На первом этапе выявляются ограничения и возможности для проектирования, в случае неоднородности использования территории района для уточнения типа застройки отдельной группы кварталов предлагается методика идентификации его типа на основе кластерного анализа объемов генерации посещений объектов разных типов. Кластерный анализ на основе набора значений генерации посещений объектов-генераторов с разделением по 10 типам функционального назначения (сформированных из 38 базовых типов, которые принимались за основу в настоящем исследовании) [8] позволяет идентифицировать тип прилегающей к улице застройки, основываясь на превалирующей функции объектов-генераторов на сегменте улично-дорожных сетей (УДС)

$$G_k = \frac{\sum_{i=1}^m S_{ik} \cdot G_{уд.k}}{100}, \quad k = 1-10, \quad (1)$$

где G_k – генерация посещений объектов (суммарное количество прибывших и убывающих посетителей), формируемых суммарной площадью типа k по фронту застройки, чел./ч на 100 м длины сегмента УДС;

$G_{уд.k}$ – удельная генерация посещений объектов типа k , чел./ч на 100 м²;

S_{ik} – используемая площадь типа k в составе объектов-генераторов, сотни м²;

k – тип функционального назначения используемой площади;

i – порядковый номер объекта-генератора;

m – количество объектов по фронту застройки.

По результатам первого этапа должны быть определены и установлены: тип градостроительного контекста и тип застройки; целевая структура мобильности и общее скоростное ограничение для транспортных средств; тип проекта.

Этап 2. Разработка. Определение диапазона классов улиц для отдельных сегментов УДС на основе оценки показателей функций «передвижения и места» и с учетом ограничений, накладываемых техническими параметрами улиц по классификации.

Для оценки показателя функции «передвижения» предлагается выполнить оценку интенсивностей движения (авт./ч). Для показателя функции «места» – оценку транспортного спроса (чел./ч на 100 м длины уличного пространства), формируемого объектами-генераторами по фронту застройки для каждого рассматриваемого участка УДС, по следующей формуле

$$G_{ул} = \frac{\sum_{k=1}^{38} \sum_{i=1}^m S_{ik} \cdot G_{уд.k}}{100}, \quad (2)$$

где $G_{ул}$ – суммарная генерация посещений объектов-генераторов с учетом всех 38 базовых типов используемой площади объектов-генераторов по фронту застройки, чел./ч на 100 м длины сегмента УДС.

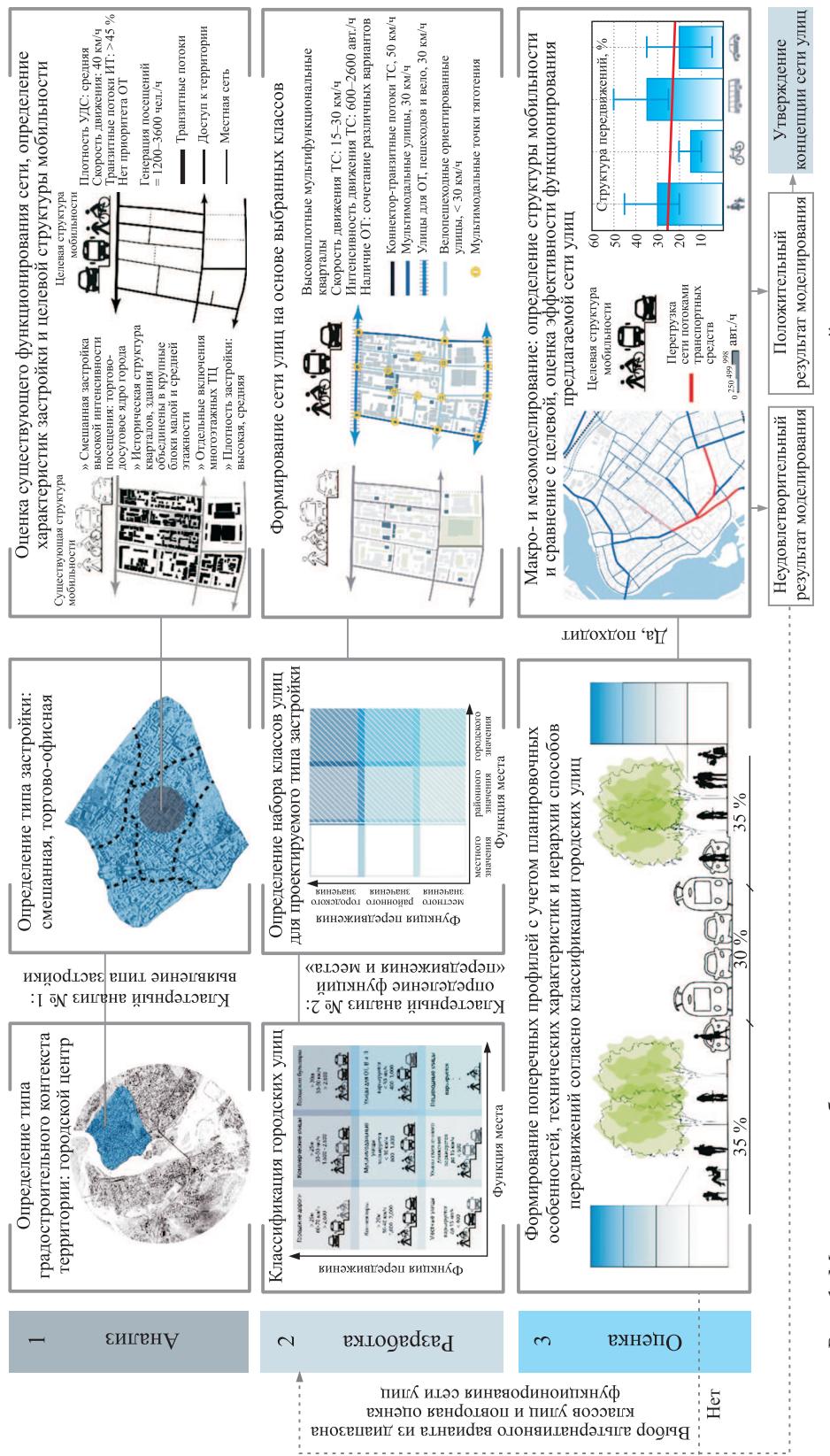


Рис. 1. Методика разработки концепции сети городских улиц на примере смешанного типа застройки города Центра

На данном этапе производится разработка концепции проекта сети улиц, с учетом установленного типа застройки и целевой структуры мобильности формируется мультимодальный транспортный план. Далее, выбирается класс улицы для каждого из рассматриваемых сегментов УДС и создается поперечный профиль, с учетом соответствующих классу улицы иерархии способов передвижений и ограничений по минимальной ширине красных линий, скорости и интенсивности движения транспортных средств. По результатам второго этапа разрабатываются схема организации дорожного движения (ОДД), альтернативные варианты поперечных профилей.

Этап 3. Оценка. Оценка структуры мобильности осуществляется на основе транспортного моделирования, достигаемой в результате применения выбранных классов улиц и сравнения ее с целевой структурой мобильности (распределение всех совершаемых передвижений в рассматриваемой зоне по способам). В качестве подхода к оценке структуры мобильности, формируемой в результате внедрения выбранных мероприятий по преобразованию сети улиц, предлагается использовать транспортное моделирование, которое позволяет определить объемы передвижений в рассматриваемую зону и из нее, внутри нее, а также проходящих сквозь нее:

$$V_i = \sum V_{i \text{ внеш. тр}} + V_{i \text{ внеш. д}} + V_{i \text{ внутр. тр}}, \quad (3)$$

где V_i – количество передвижений определенного способа, совершаемых по разным целям в час;

$V_{i \text{ внеш.тр}}$ – объем передвижений определенного способа по целям внешнего транзита в час;

$V_{i \text{ внеш.д}}$ – объем передвижений определенного способа по целям внешнего доступа в час;

$V_{i \text{ внутр.тр}}$ – объем передвижений определенного способа по целям внутреннего транзита в час;

i – способ передвижения: пешком (П), на велосипеде (В), с использованием общественного транспорта (ОТ), с использованием индивидуального транспорта (ИТ);

$$V = \sum V_{\Pi} + V_{\text{В}} + V_{\text{ОТ}} + V_{\text{ИТ}}, \quad (4)$$

где V – количество передвижений, совершаемых всеми способами передвижений по разным целям в час;

$$P_i = \frac{\sum V_i}{V}, \quad \text{при этом } \sum P_i = 100 \%, \quad (5)$$

где P_i – доля передвижений, совершаемых определенным способом, %.

На данном этапе производится оценка функционирования сети предлагаемых улиц с помощью методов мезо- и макромоделирования для определения распределения передвижений по способам согласно установленной структуре мобильности показателей, показателей доступности и связанности территории. При положительной оценке по результатам моделирования устанавливается оптимальный вариант: поперечных профилей, схемы ОДД, дизайна перекрестков. При неудовлетворительной оценке производится корректировка классов улиц (выбор другого альтернативного варианта поперечного профиля или альтернативного класса улицы из установленных на вто-

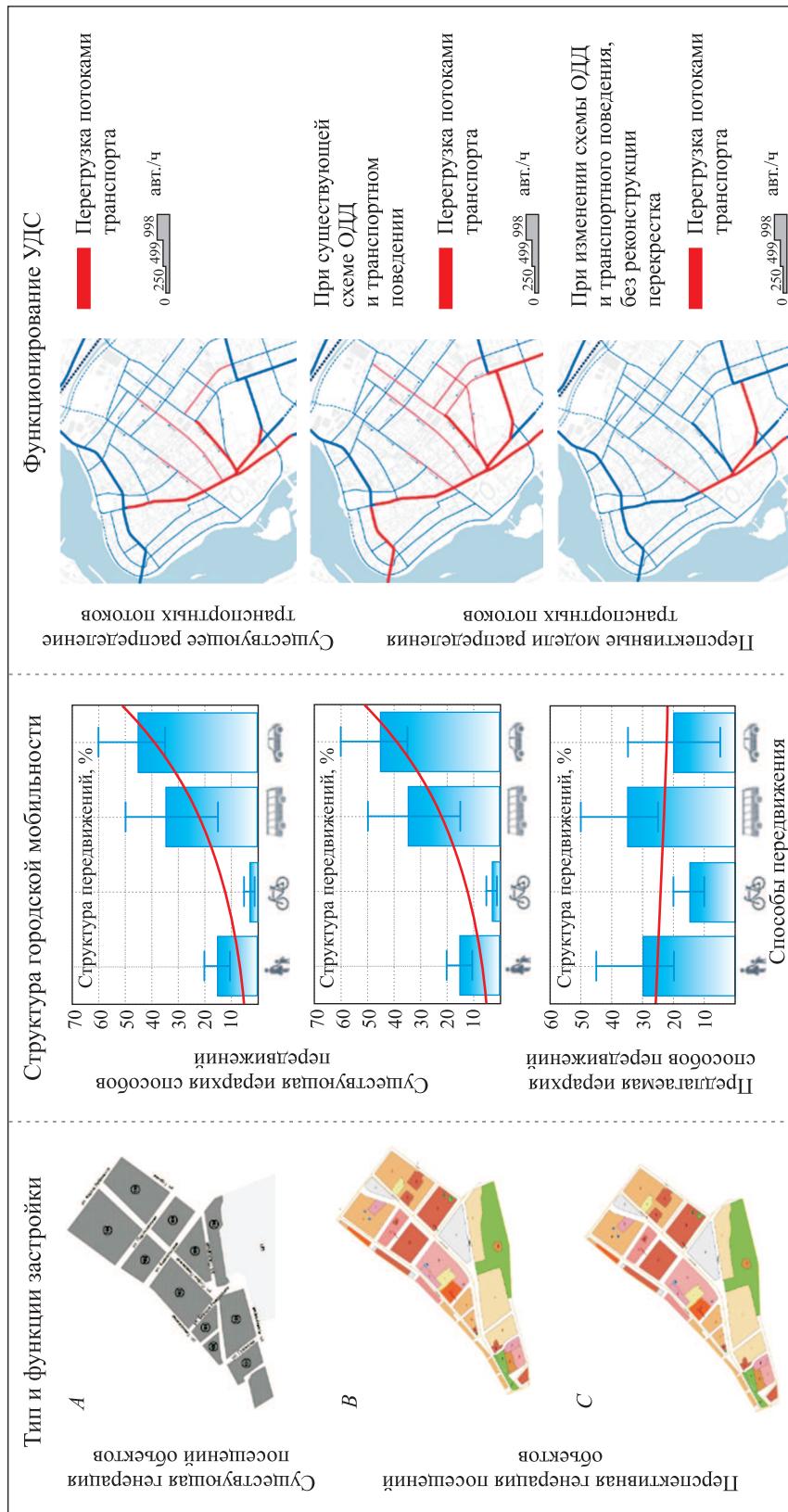


Рис. 2. Варианты развития транспортной системы
А – существующая ситуация; Б – изменение характеристик городской среды при существующей сети улиц; С – проектная ситуация
Иллюстрация представлена с использованием материалов концепции развития иркутских кварталов

ром этапе) и повторная оценка структуры мобильности в случае ее несоответствия целевой.

Среди предлагаемых потенциальных вариантов развития сети улиц оптимальным считается тот, который подойдет по техническим характеристикам уличного пространства и по результатам моделирования функционирования уличной сети позволит обеспечить лучшие условия доступности рассматриваемой территории города, одновременно создавая комфортные условия движения внутри проектируемого участка УДС.

Апробация предлагаемой методики проектирования выполнена в качестве оценки влияния предлагаемых мероприятий по реформированию УДС на изменение транспортного спроса и перераспределение транспортных потоков на примере участка центральной части г. Иркутска, в котором преобладают улицы, характеризующиеся одновременно высокой значимостью функций «передвижения и места». Входящими параметрами служили: предложения по сохранению исторической застройки [9, 10]; изменение характеристик функционального наполнения объектов-генераторов, в частности, преобразование торгово-офисного ядра в застройку смешанного типа; перспективная оценка транспортного спроса; рекомендованные по результатам исследования целевая структура мобильности и типы улиц для смешанного типа застройки. Согласно этапам данной методики предложены концепция развития УДС, схема ОДД и варианты поперечных профилей уличного пространства.

В ходе эксперимента промоделировано три сценария развития транспортной системы (рис. 2), для каждого из которых оценена загрузка сети потоками транспортных средств. С учетом изменения типа застройки без изменения параметров уличной сети происходит увеличение транспортных нагрузок, при этом структура мобильности остается на уровне существующей ситуации (рис. 2, В). В результате применения предложенной конфигурации сети, согласно классам улиц для смешанного типа застройки городского центра, происходит распределение всех передвижений по способам, соотношение которых определяется на основе моделирования. В проектной ситуации (рис. 2, С) полученное процентное соотношение всех передвижений по способам соответствует целевой структуре мобильности по трем позициям. Увеличение количества передвижений на велосипеде превысило существующее значение, однако не достигло условий целевой структуры мобильности, поскольку требует полноценного развития сети велокоммуникаций в рамках всего города. Однако при дизайне уличного пространства в смешанном типе застройки городского центра потребности велосипедистов, пользователей общественного транспорта и пешеходов рассматриваются в первую очередь.

Заключение. По результатам моделирования оценен эффект предлагаемых мероприятий по реформированию сети улиц согласно предложенной методике проектирования. Застройка смешанного использования взамен торгово-офисного ядра позволила сбалансировать функции объектов притяжения. Изменения схемы ОДД повысили транспортную доступность центра города на 20 %. Сокращены потоки индивидуальных транспортных средств на 25 % посредством обеспечения доступа к формируемым парковочным местам и приоритета движения общественного транспорта – на 10 % улиц выделены полосы для обособленного движения автобусов и трамваев; формирования на 90 % улиц велосипедной инфраструктуры, велопарковок.

Настоящее исследование поддержано грантом службы австрийских академических обменов (OeAD) в 2016 г., отдельная благодарность профессору Г. Хаугер и сотрудникам кафедры пространственного развития Технического университета г. Вены за помощь в сборе нормативной и аналитической информации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. The Urban Street Design Guide. NACTO – National Association of City Transportation Officials, Island Press. 2012. 320 p.
2. Михайлов А.Ю., Головын И.М. Современные тенденции проектирования и реконструкции улично-дорожных сетей городов. Новосибирск: Наука, 2004. 267 с.
3. Directives for the Design of Urban Roads. RAST 06. Road and Transportation Research Association. VGSV Verlag GmbH, 2006. 67 p.
4. Duany A., Sorlieen S., Wright W. Smart Code Version 9 and Manual. New Urban News Publications, 2008. 132 p.
5. D1. A First Theoretical Approach to Classification of Arterial Streets. Prepared by Stephen Marshall, Univ. of Westminster. European Commission Fifth Framework Programme Key Action: City of Tomorrow and Cultural Heritage, 2007. 116 p.
6. Roads Task Force. The vision and direction for London's streets and roads. Mayor of London: London, UK, 2012. Режим доступа: content.tfl.gov.uk. (Дата обращения 12.02.2017).
7. Boston complete streets manual. Режим доступа:
http://bostoncompletestreets.org/pdf/2013/BCS_Guidelines.pdf
8. Левашев А.Г. Измерение генерации посещений объектов массового обслуживания населения // Изв. Волгоград. гос. техн. ун-та: Межвуз. сб. науч. ст. 2014. № 3. С. 75–78. (Сер. Наземные транспортные системы. Вып. 8).
9. Пуляевская О.В., Пуляевская Е.В. Типология и морфотипы жилых кварталов исторической застройки в контексте социально-психологического подхода // Вестн. ИрГТУ. 2014. № 6. С. 125–128.
10. Преловская Е.С., Пуляевская Е.В. Исторический центр города: предложения по сохранению и развитию уличного пространства // Вестн. ИрГТУ. Градостроительство и архитектура. 2015. № 1. С. 112–118.

Преловская Евгения Сергеевна, магистр, инж.; E-mail: jessprelove@gmail.com
ООО «ЦТТ», г. Иркутск

Левашев Алексей Георгиевич, магистр, канд. техн. наук, доц.; E-mail: alexey.levashev@tl-istu.com

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Михайлов Александр Юрьевич, д-р техн. наук, проф.

Иркутский национальный исследовательский технический университет

Кламер Михаэль, д-р техн. наук, доц.; E-mail: michael.klammer@tuwien.ac.at

Технический университет Вены, Австрия

Получено после доработки 29.08.17

Prelovskaya Evgeniya Sergeevna, MSc, Engineer; E-mail: jessprelove@gmail.com
ООО «ЦТТ», Irkutsk, Russia

Levashev Alexey Georgievich, MSc, PhD, Ass. Professor;
E-mail: alexey.levashev@tl-istu.com

Irkutsk National Research Technical University, Russia

Mikhaylov Aleksandr Yuryevich, DSc, Professor
Irkutsk National Research Technical University, Russia

Klamer Michael, DSc, Ass. Professor; E-mail: michael.klamer@tuwien.ac.at
Technical University of Vienna, Austria

DEVELOPMENT OF COMPLETE STREET DESIGN APPROACH FOR RUSSIAN CITIES

The existing urban infrastructure of Russian cities cannot support endless increasing motorization rates, modern solutions for sustainable urban and transport development also demand rethinking of street planning and design approach in order to balance character of adjacent land use context and mobility behavior. The article describes a proposed approach to complete street design for Russian cities, which defines street cross sections taking into account the characteristics of the urban environment, street functions as “movement and place”. This approach is based on complete street and context sensitive design principles, using the cluster analysis method to determine the type of development code and according to its characteristics recommends the target mode hierarchy and street classes. By means of transport modeling the impact of street network redesigning solutions on changing transportation demand is estimated on the example of Irkutsk city center. The redistribution of traffic flows indicates decreasing traffic load of studied area in favor of sustainable transport modes.

К e y w o r d s: transportation planning, green urban mobility, complete street design, cluster analysis, street network modeling.

REFERENCES

1. The Urban Street Design Guide. NACTO – National Association of City Transportation Officials, Island Press. 2012. 320 p.
2. M i k h a j l o v A.Yu., G o l o v n y k h I.M. Sovremennye tendentsii proektirovaniya i rekonstruksii ulichno-dorozhnykh setey gorodov [Modern trends in design and reconstruction of urban street networks]. Novosibirsk: Nauka, 2004. 267 p. (in Russian)
3. Directives for the Design of Urban Roads. RAST 06. Road and Transportation Research Association. VGSV Verlag GmbH, 2006. 67 p.
4. Duany A., Sorlien S., Wright W. Smart Code Version 9 and Manual. New Urban News Publications, 2008. 132 p.
5. D1. A First Theoretical Approach to Classification of Arterial Streets. Prepared by Stephen Marshall, Univ. of Westminster. European Commission Fifth Framework Programme Key Action: City of Tomorrow and Cultural Heritage, 2007. 116 p.
6. Roads Task Force. The vision and direction for London's streets and roads. Mayor of London: London, UK, 2012. Available at: content.tfl.gov.uk. (Date of access 12.02.2017).
7. Boston complete streets manual. Available at: http://bostoncompletestreets.org/pdf/2013/BCS_Guidelines.pdf
8. L e v a s h e v A.G. Izmerenie generatsii poseshcheniy ob"ektov massovogo obsluzhivaniya naseleniya [Trip generation estimation of big public facility center]. Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta: mezhvuz. sb. nauch. st. 2014. No. 3. Pp. 75–78. (in Russian)
9. P u l y a e v s k a y a O.V., P u l y a e v s k a y a E.V. Tipologiya i morfotipy zhilykh kvartalov istoricheskoy zastroyki v kontekste sotsial'no-psichologicheskogo podkhoda [Typology and morphotypes of historic housing development in terms of socio-psychological approach]. Vestnik IrGTU [Journal IrSTU]. 2014. No. 6. Pp. 125–128. (in Russian)
10. P r e l o v s k a y a E.S., P u l y a e v s k a y a E.V. Istoricheskiy tsentr goroda: predlozheniya po sokhraneniyu i razvitiyu ulichnogo prostranstva [Historical city center: proposals on street space preservation and development]. Vestnik IrGTU. Gradostroitel'stvo i arkhitektura [Journal IrSTU]. 2015. No. 1. Pp. 112–118, (in Russian)

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
«СТРОИТЕЛЬСТВО»

Издаётся с марта 1958 г.

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, вступивший в силу с 1 декабря 2015 г.; входит в международную базу данных CA(pt) (Chemical Abstracts).

В журнале публикуются статьи, содержащие новые результаты научных исследований теоретического и прикладного характера, обзорные статьи по состоянию, научным проблемам и перспективам развития теории архитектуры, строительных наук и строительной отрасли, рецензии на книги, научно-техническая информация. Авторы и читатели журнала – научно-педагогические работники, аспиранты, студенты старших курсов строительных вузов, сотрудники научно-исследовательских и проектных институтов, строительных организаций и предприятий.

ТЕМАТИЧЕСКИЕ РАЗДЕЛЫ ЖУРНАЛА:

- Теория сооружений
- Строительные конструкции, здания и сооружения. Основания и фундаменты
- Строительные материалы и изделия
- Инженерные системы жизнеобеспечения населенных мест, зданий и сооружений. Экологическая безопасность строительства
- Гидroteхническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология
- Технология и организация строительства
- Научные проблемы архитектуры, градостроительства и экологии
- Научно-методический раздел
- В лабораториях вузов
- Достижения науки – производству
- Научно-техническая информация

Принимается подписка
на 2-е полугодие по каталогу «Роспечать» 2017 г.

Каталожная цена за 6 месяцев – 4200 р.
Цена отдельного номера – 700 р.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Для оформления научных статей по требованиям ВАК, РИНЦ, Scopus на сайте нашего журнала <http://izvuz.str.sibstrin.ru> помещены «ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ, ПРЕДСТАВЛЕНИЯ И РЕДАКЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ РУКОПИСЕЙ СТАТЕЙ».

Просим Вас обратить особое внимание на составление библиографического списка на английском языке – REFERENCES:

- для ссылок на зарубежные источники 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; название статьи; затем в квадратных скобках – название статьи в переводе на английский язык; остальные элементы библиографического описания на английском языке, с исключением разделителей, таких как /, –, //, и заменой №, с. и С. соответственно на No., p. и Pr., в конце – (in Russian).

Примеры оформления текста статей и REFERENCES – в рубрике «полнотекстовые версии статей».

Журнал публикует информацию о научно-технических разработках в области строительства объемом 1 с., включая 1–2 иллюстрации. Обязательны сведения о разработчиках: фамилия, имя, отчество полностью; звания; контактная информация, место работы.

Редакция имеет право на редакционную обработку статьи. Для контакта с редактором просим сообщать номер мобильного телефона одного из авторов (не для опубликования).

ББК 38
И 33
УДК 69

Научное издание

**Известия вузов
СТРОИТЕЛЬСТВО**

№ 9 (705) 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*

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 29.09.17. Формат 70×108 $\frac{1}{16}$
Усл. печ. л. 10,15+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 6939

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