

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛОГОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**ВЕСТНИК
ВОЛОГОДСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Основан в 2018 г.

№ 4 (10) / 2020

СЕРИЯ: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ВОЛОГДА
2020

№ 4 (10) / 2020 / ДЕКАБРЬ. Выходит 4 раза в год.

Научный журнал «Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки» включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) с 2018 г.

Полнотекстовые версии выпусков научного журнала размещены в свободном доступе на сайте Научной электронной библиотеки (www.elibrary.ru)

Серия: Технические науки

Группы специальностей: 05.02.00 Машиноведение, системы приводов и детали машин;
05.13.00 Информатика, вычислительная техника и управление;
05.23.00 Строительство и архитектура

Учредитель и издатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Вологодский государственный университет»

Свидетельство о регистрации СМИ: ПИ № ФС77-75456 от 05 апреля 2019 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Главный редактор

А.А. Кочкин, доктор технических наук, зав. кафедрой промышленного и гражданского строительства, доцент Вологодского государственного университета

Заместители главного редактора:

А.Е. Немировский, доктор технических наук, профессор Вологодского государственного университета,

А.Н. Швецов, доктор технических наук, профессор Вологодского государственного университета

Секретарь

В.А. Раков, кандидат технических наук, доцент Вологодского государственного университета

Члены редколлегии:

А.Н. Алюнов, кандидат технических наук, зам. директора Института машиностроения, энергетики и транспорта Вологодского государственного университета,

В.П. Гусев, доктор технических наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН),

И.В. Зефирова, кандидат технических наук, доцент Вологодской государственной молочнохозяйственной академии им. Н.В. Верещагина,

К.В. Кияненко, доктор архитектуры, профессор Вологодского государственного университета,

В.И. Леденёв, доктор технических наук, профессор Тамбовского государственного технического университета,

С.В. Лукин, доктор технических наук, профессор Череповецкого государственного университета,

В.И. Римшин, доктор технических наук, профессор Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН),

А.С. Степанов, кандидат технических наук, доцент Вологодского государственного университета,

С.А. Мясникова, кандидат технических наук, зам. директора Инженерно-строительного института Вологодского государственного университета,

А.А. Фролов, кандидат технических наук, директор Института машиностроения, энергетики и транспорта Вологодского государственного университета,

В.А. Шорин, доктор химических наук, профессор Вологодского государственного университета,

И.Л. Шубин, доктор технических наук, директор Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН)

Переводчик – *Т.В. Михайлюк*, кандидат педагогических наук, доцент Вологодского государственного университета

Редакторы – А.И. Ланькова, А.П. Митракова, Н.Н. Постникова

Оригинал-макет – Н.В. Подхомотова

Адрес редакции: 160000, г. Вологда, ул. Сергея Орлова, д. 6, каб. 202а; тел.: 8 (8172) 76-91-92, 72-11-55
e-mail: vestniktech@vogu35.ru

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION OF THE RUSSIAN FEDERATION
FEDERAL STATE BUDGETARY EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION
VOLOGDA STATE UNIVERSITY

BULLETIN OF VOLOGDA STATE UNIVERSITY

SCIENTIFIC JOURNAL

First published in 2018

No. 4 (10) / 2020

SERIES: TECHNICAL SCIENCIES

VOLOGDA
2020

No. 4 (10) / 2020 / DECEMBER. It is issued 4 times a year.

Scientific Journal "Bulletin of Vologda State University. Series: Technical sciences" has been included into Russian Science Citation Index (RSCI) since 2018.

Full-text versions of the scholarly journal issues are freely available on the website of Scientific Electronic Library (www.elibrary.ru)

Series: Technical Sciences

Academic areas: 05.02.00 Mechanical engineering, drive systems and machine parts;
05.13.00 Computer science, computer engineering and management;
05.23.00 Construction and architecture

Founder and publisher: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Vologda State University

Mass Media Registration Certificate: PI No. FS77-75456 dated of April 05, 2019 was issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technologies and Mass Communications (Roskomnadzor)

Editor-in-Chief

A.A. Kochkin, Doctor of Engineering, Head of the Department of Industrial and Civil Construction, Associate Professor of Vologda State University

Assistant editors:

A.N. Shvetsov, Doctor of Engineering, Professor of Vologda State University

A.E. Nemirovsky, Doctor of Engineering, Professor of Vologda State University

Secretary:

V.A. Rakov, Candidate of Engineering, Associate Professor of Vologda State University

Members of the Editorial Board:

A.N. Alyunov, Candidate of Engineering, Deputy Director of the Institute of Engineering, Energy and Transport, Vologda State University,

V.P. Gusev, Doctor of Engineering, Senior Researcher, Head of the Laboratory of the Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN),

I.V. Zefirov, Candidate of Engineering, Associate Professor of Vologda State Dairy and Economics Academy named after N.V. Vereshchagin,

K.V. Kiyanko, Doctor of Architecture, Professor of Vologda State University,

V.I. Ledenev, Doctor of Engineering, Professor of Tambov State University,

S.V. Lukin, Doctor of Engineering, Professor of Cherepovets State University,

V.I. Rimshin, Doctor of Engineering, Professor of the Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN),

S.A. Myasnikova, Candidate of Engineering, Deputy Director of Civil Engineering Institute of Vologda State University,

A.A. Frolov, Candidate of Engineering, Director of the Institute of Mechanical Engineering, Energy and Transport of Vologda State University,

A.S. Stepanov, Candidate of Engineering, Associate Professor of Vologda State University,

V.A. Shorin, Doctor of Chemistry, Professor of Vologda State University,

I.L. Shubin, Doctor of Engineering, Director of the Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences (NIISF RAASN)

Translator – *T.V. Mikhailyuk*, Candidate of Pedagogy, Associate Professor of Vologda State University

Editors – *A.I. Lankova*, *A.P. Mitrakova*, *N.N. Postnikova*

Original layout – *N.V. Podhomutova*

Editorial office: 160000, Vologda, Sergeya Orlova st., 6, office 202a; tel.: 8 (8172) 76-91-92, 72-11-55
e-mail: vestniktech@vogu35.ru

Содержание

МАШИНОВЕДЕНИЕ, СИСТЕМЫ ПРИВОДОВ И ДЕТАЛИ МАШИН

<i>Аваев А.А.</i> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМИЧЕСКОЙ ВУЛКАНИЗАЦИИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ ТРУБЧАТОЙ ФОРМЫ.....	7
<i>Бормосов Н.А., Белянина А.Ю., Кочкарева Т.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ	9
<i>Бормосов Н.А., Кочкарева Т.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ГУММИРОВОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ	14
<i>Попов И.П.</i> НАЛОЖЕНИЕ ВРАЩЕНИЙ В МЕХАНИЗМАХ	19
<i>Степанов А.С., Яхричев В.В.</i> РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОЙ 3D-МОДЕЛИ ИЗДЕЛИЯ СО СПИРАЛЬНО-СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПЕРЕМЕННОГО ШАГА	24
<i>Фролов А.А., Белоусов А.Л., Белоусова В.П.</i> ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ БИЗНЕСА КАК ЗНАЧИМЫЙ ФАКТОР ВЛИЯНИЯ НА РАЗВИТИЕ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ И МЕТАЛЛУРГИИ.....	31
<i>Щекин С.М., Никифорова М.М.</i> РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТОВ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ В МЕТАЛЛУРГИИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ.....	35

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Корнеев А.П.</i> ПРИМЕНЕНИЕ МАТЛАВ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	38
<i>Кузьмин А.Г., Умаров М.Ф.</i> КИБЕРНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЙ ДЫХАТЕЛЬНОГО ГОМЕОСТАЗА	41
<i>Саниев А.З.</i> ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ СЕТИ ПО КЛАВИАТУРНОМУ ПОЧЕРКУ...45	45

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<i>Вольников М.И., Гашицкий М.С.</i> УПРАВЛЕНИЕ ВИБРОЗАЩИТОЙ ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНЫХ СРЕД	47
<i>Габитов Н.Н., Шапкина В.А., Габитова А.Н.</i> РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ НЕФТЯНЫХ ВЯЖУЩИХ НА ОСНОВЕ ГУДРОНОВ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ХОЛОДНЫХ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ СМЕСЕЙ	51
<i>Калайдо А.В., Римшин В.И., Семенова М.Н., Быков Г.С.</i> АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДОНОВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ (НА ПРИМЕРЕ США)	54
<i>Павлов М.В., Карпов Д.Ф.</i> КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОТОПЛЕНИЯ ЗИМНЕЙ ТЕПЛИЦЫ	59
<i>Поляков Т.А., Полуэктова Н.А., Поварова О.А.</i> РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ, ПОРАЖЕННОЙ ГРИБАМИ <i>SERPULA LACRYMANS</i>	64
<i>Римшин В.И., Кецко Е.С., Трунцов П.С., Кузина И.С., Быков Г.С.</i> РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА УСИЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	67
<i>Соловьев С.А., Соловьева А.А., Пивень В.Ю., Шевцов Л.С.</i> ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНОЙ ПЛОСКОЙ ФЕРМЫ	78
<i>Шорин В.А., Вельсовский А.Ю.</i> ИОННЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ КАК СПОСОБ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ	82
<i>Сведения об авторах</i>	88

CONTENTS

MACHINING, DRIVE SYSTEMS AND MACHINE PARTS 05.02

<i>Avaev A.A.</i> MATHEMATICAL MODEL OF THERMAL VULCANIZATION OF TUBULAR SHAPE ELASTOMERIC OBJECTS	7
<i>Bormosov N.A., Belyanina A.Yu., Kochkareva T.A.</i> RESEARCH OF HEAT EXCHANGE DURING HIGH-TEMPERATURE SURFACE COOLING	9
<i>Bormosov N.A., Kochkareva T.A.</i> HEAT EXCHANGE RESEARCH WHEN COOLING RUBBER COATING.....	14
<i>Popov I.P.</i> SUPERPOSITION OF ROTATIONS IN MECHANISMS	19
<i>Stepanov A.S., Yakhrichev V.V.</i> DEVELOPMENT OF METHOD FOR CONSTRUCTING DIGITAL 3D MODEL OF A PRODUCT WITH SPIRAL-SPHERICAL SURFACE OF VARIABLE PITCH.....	24
<i>Frolov A.A., Belousov A.L., Belousova V.P.</i> DIGITAL BUSINESS TRANSFORMATION AS A SIGNIFICANT FACTOR OF INFLUENCE ON THE DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL INTERACTION OF ENGINEERING AND METALLURGY.....	31
<i>Shchekin S.M., Nikiforov M.M.</i> DEVELOPMENT OF PREDICTIVE ANALYTICS TOOLS IN METALLURGY BASED ON A MODEL FOR PREDICTING THE EVOLUTION OF PROCESSES AND SYSTEMS.....	35

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT 05.13

<i>Korneev A.P.</i> MATLAB APPLICATION FOR MATHEMATICAL MODELING OF AN ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH DISTRIBUTED PARAMETERS.....	38
<i>Kuzmin A.G., Umarov M.F.</i> CYBERNETIC ANALYSIS OF RESPIRATORY HOMEOSTASIS CONDITIONS	41
<i>Sapiev A.Z.</i> IDENTIFICATION OF NETWORK USERS BY KEYBOARD RHYTHM.....	45

CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE 05.23

<i>Volnikov M.I., Gashitskiy M.S.</i> CONTROL OF PIPELINES VIBRATION PROTECTION BASED ON DISCRETE ENVIRONMENT	47
<i>Gabibov N.N., Shapkina V.A., Gabibova A.N.</i> DEVELOPMENT OF TAR-BASED OIL BINDERS FOR COLD ORGANIC-MINERAL MIXTURES PREPARATION	51
<i>Kalaydo A.V., Rimshin V.I., Semenova M.N., Bykov G.S.</i> ANALYSIS OF FOREIGN EXPERIENCE IN ENSURING RADON SAFETY OF OPERATED BUILDINGS (ON THE EXAMPLE OF THE UNITED STATES OF AMERICA)	54
<i>Pavlov M.V., Karpov D.F.</i> WINTER GREENHOUSE COMBINED HEATING SYSTEM	59
<i>Polyakov T.A., Poluektova N.A., Povarova O.A.</i> DEVELOPMENT OF RESTORING METHODS OF WOOD DAMAGED BY FUNGI SERPULA LACRYMANS.....	64
<i>Rimshin V.I., Ketsko E.S., Truntov P.S., Kuzina I.S., Bykov G.S.</i> RESULTS OF CALCULATION OF BUILDING CONSTRUCTIONS STRENGTHENING USING FINITE ELEMENT METHOD.....	67
<i>Solovev S.A., Soloveva A.A., Piven V.Yu., Shevtsov L.S.</i> STRUCTURAL RELIABILITY ANALYSIS OF PLANAR TRUSS ELEMENTS	78
<i>Shorin V.A., Velsovsky A.Y.</i> ION STABILIZERS AS A WAY TO IMPROVE THE CHARACTERISTICS OF CLAY SOILS	82
<i>Information about the authors</i>	88



**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕРМИЧЕСКОЙ ВУЛКАНИЗАЦИИ
ЭЛАСТОМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ ТРУБЧАТОЙ ФОРМЫ**

В данной работе представлена модель контактной термической вулканизации объектов трубчатой формы. Модель основана на аналитическом решении уравнения теплопроводности применительно к бесконечному полному осесимметричному цилиндру.

Эластомер, контактная термическая вулканизация, трубчатая форма, математическая модель, инженерные расчеты, аналитическое решение, уравнение теплопроводности, полный осесимметричный цилиндр.

В современной технике широко используют изделия, изготовленные на основе различных видов эластомеров. Процесс вулканизации эластомера является достаточно сложным, требующим надежной и эффективной организации. В целях оптимизации процесса вулканизации создают соответствующую математическую модель. Такая модель должна по возможности наилучшим образом описывать процесс вулканизации и в то же время быть относительно простой и доступной для проведения соответствующих инженерных расчетов.

В рассматриваемом случае расчетная схема представляет собой бесконечный осесимметричный цилиндр, внутренний диаметр которого составляет $D_1 = 2R_1$, а внешний – $D_2 = 2R_2$ (рис. 1). На схеме эластомер выделен серым цветом.

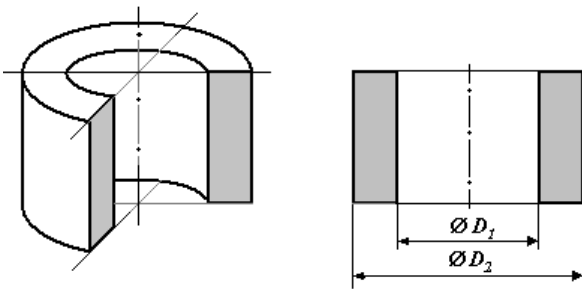


Рис. 1. Расчетная схема модели теплопроводности

Нестационарный перенос тепла в эластомере в данном случае описывается линейным уравнением теплопроводности [1] применительно к полярной системе координат

$$\frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 t(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right] + w(r, \tau), \quad (1)$$

$$(R_1 < r < R_2; 0 < \tau < +\infty),$$

где $t(r, \tau)$ – температура эластомера в точке с полярной координатой r в момент времени τ , °C; a – коэффициент температуропроводности эластомера, м²/с;

$w(r, \tau)$ – приведенная удельная мощность внутреннего источника (стока) тепла, °C/с.

Введение в уравнение (1) слагаемого $w(r, \tau)$ объясняется тем, что в общем случае, когда нельзя пренебречь содержанием в эластомере свободной серы, следует учитывать как процесс ее плавления в начальной стадии вулканизации, сопровождающийся поглощением тепла и продвижением фронта фазового перехода вглубь эластомера, так и последующий процесс связывания свободной серы, сопровождающийся тепловыделением [2].

Так как рассматриваемая математическая модель соответствует процессу контактной термической вулканизации, то для решения уравнения (1) нужно использовать следующие краевые условия:

$$t(r, 0) = f(r); \quad (2)$$

$$t(R_1, \tau) = t_c(\tau); \quad (3)$$

$$t(R_2, \tau) = t_c(\tau). \quad (4)$$

Условие (2) является начальным и описывает распределение температуры в эластомере в момент времени $\tau = 0$. Наличие в правой части условия (2) функции $f(r)$ общего вида позволяет работать с так называемыми кусочно-постоянными значениями параметров внутреннего теплопереноса [3].

Условия (2), (3) являются граничными. Они задают значения температуры на цилиндрических поверхностях $r = R_1$ и $r = R_2$, соответственно. Присутствие одной и той же функции $t_c(\tau)$ в правых частях условий (3) и (4) объясняется необходимостью создания одинаковых условий на обеих цилиндрических поверхностях. Зависимость от времени функции $t_c(\tau)$ позволяет оптимальным образом выбирать условия вулканизации для эластомеров различных типов.

Решение уравнения (1) для краевых условий (2)–(4) получено при использовании конечных интегральных преобразований Ханкеля и может быть представлено в виде

$$t(r, \tau) = \left[\frac{\ln\left(\frac{r}{R_2}\right)}{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)} + \frac{\ln\left(\frac{r}{R_1}\right)}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \right] t_c(\tau) + \frac{\pi^2}{2R_1^2} \sum_{m=1}^{\infty} T(\mu_m, \tau) - \frac{2R_1^2 t_c(\tau)}{\pi \mu_m^2} \left[\frac{J_0(\mu_m)}{J_0\left(\mu_m \frac{R_2}{R_1}\right)} - 1 \right] \frac{\mu_m^2 J_0^2\left(\mu_m \frac{R_2}{R_1}\right) \psi\left(\mu_m \frac{r}{R_1}\right)}{J_0^2(\mu_m) - J_0^2\left(\mu_m \frac{R_2}{R_1}\right)}, \quad (5)$$

где

$$T(\mu_m, \tau) = \int_0^{\tau} \left\{ \frac{2at_c(\omega)}{\pi} \left[\frac{J_0(\mu_m)}{J_0\left(\mu_m \frac{R_2}{R_1}\right)} - 1 \right] + \int_{R_1}^{R_2} w(r, \omega) r \psi\left(\mu_m \frac{r}{R_1}\right) dr \right\} e^{-a\left(\frac{\mu_m}{R_1}\right)^2 (\tau - \omega)} d\omega + \left[\int_{R_1}^{R_2} f(r) r \psi\left(\mu_m \frac{r}{R_1}\right) dr \right] e^{-a\left(\frac{\mu_m}{R_1}\right)^2 \tau};$$

$$\psi\left(\mu_m \frac{r}{R_1}\right) = Y_0(\mu_m) J_0\left(\mu_m \frac{r}{R_1}\right) - J_0(\mu_m) Y_0\left(\mu_m \frac{r}{R_1}\right);$$

$J_0(z), Y_0(z)$ – функции Бесселя нулевого порядка соответственно 1-го и 2-го рода; ω – переменная интегрирования; $\mu_m > 0$ ($m = 1, 2, \dots$) – корни уравнения

$$J_0(\mu) Y_0\left(\mu \frac{R_2}{R_1}\right) - Y_0(\mu) J_0\left(\mu \frac{R_2}{R_1}\right) = 0.$$

На рисунке 2 представлены результаты расчетов, выполненных на основании решения (5), для случая контактной вулканизации объекта трубчатой формы, изготовленного из эластомера марки 2566. Размеры объекта составили $R_1 = 0,02$ м, $R_2 = 0,025$ м. При этом $f(\tau) = 25$ °С, $t_c(\tau) = 100$ °С.

Линии 1, 2, 3, 4, которые представляют собой часть линий температурного поля вулканизуемого эластомера, соответствуют следующим значениям времени: $\tau_1 = 10$ с.; $\tau_2 = 10$ с.; $\tau_3 = 10$ с.; $\tau_4 = 10$ с. Симметричность этих линий относительно поверхности

$r = (R_1 + R_2)/2 = 0,0225$ м обеспечена в результате задания одной и той же функции $t_c(\tau)$ как на поверхности $r = R_1$, так и на поверхности $r = R_2$.

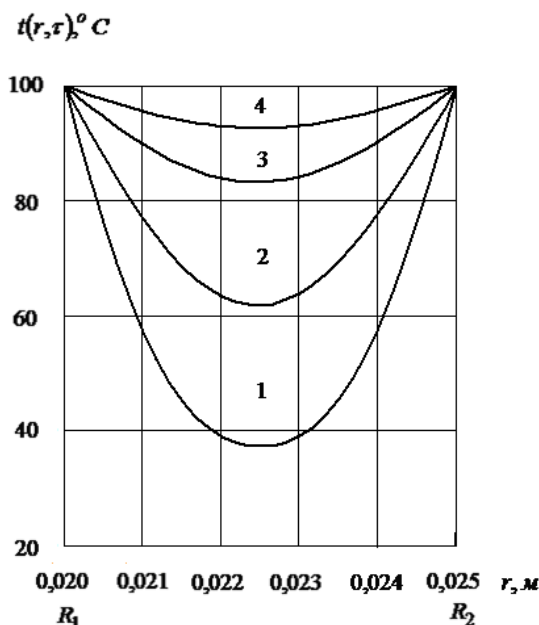


Рис. 2. Результаты расчетов для случая контактной вулканизации объекта трубчатой формы (линии 1, 2, 3, 4 соответствуют следующим значениям времени: $\tau_1 = 10$ с.; $\tau_2 = 10$ с.; $\tau_3 = 10$ с.; $\tau_4 = 10$ с.)

Апробация предлагаемой математической модели показала возможность ее применения в проведении инженерных расчетов при прогнозировании оптимальных режимов вулканизации объектов трубчатой формы.

Литература

1. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва : Высшая школа, 1967. – 600 с.
2. Лукомская, А. И. Тепловые основы вулканизации резиновых изделий / А. И. Лукомская, П. Ф. Баденков, Л. М. Кеперша. – Москва : Химия, 1972. – 360 с.
3. Аваев, А. А. Математическое моделирование нестационарной теплопроводности при вулканизации эластомерных покрытий на тканевых и металлических подложках : монография / А. А. Аваев. – Череповец : ГОУ ВПО ЧГУ, 2010. – 133 с.

A.A. Avaev

Cherepovets State University

MATHEMATICAL MODEL OF THERMAL VULCANIZATION OF TUBULAR SHAPE ELASTOMERIC OBJECTS

This paper presents a model of contact thermal vulcanization of tubular objects. The model is based on the analytical solution of the heat conduction equation as applied to an infinite hollow axisymmetric cylinder.

Elastomer, contact thermal vulcanization, tubular shape, mathematical model, engineering calculations, analytical solution, heat conduction equation, hollow axisymmetric cylinder.



ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Цель исследования состоит в получении метода расчета теплообмена при охлаждении высокотемпературной поверхности плоскофакельными форсунками. При решении использована нестационарная методика исследования теплообмена капли с нагретой поверхностью. Получены экспериментальные зависимости теплосъема капли от размера.

Охлаждение, теплообмен, высокотемпературная поверхность, упорядоченное взаимодействие, нестационарная методика исследования, температурное поле, трехмерная функция Дирака.

Процессы охлаждения металла диспергированной (распыленной) жидкостью, подаваемой на высокотемпературную металлическую поверхность, имеют большое практическое значение в металлургии. Теплообмен распыленной жидкости с поверхностью металла является довольно сложным явлением. Если степень диспергированности жидкости достаточно велика, то ее можно рассматривать как ансамбль капель, налетающих на поверхность. В этом случае теплообмен будет определяться суммарным тепловым эффектом от взаимодействия одиночных капель с нагретой поверхностью. Поэтому основой расчета охлаждения высокотемпературной поверхности каплями диспергированной жидкости являются расчеты плотности теплового потока, идущего на испарение капли при ее непосредственном взаимодействии с поверхностью, и коэффициента теплоотдачи. В основу расчетов положена модель упорядоченного взаимодействия отдельных капель со стенкой, при котором не происходит взаимного наложения отдельных актов взаимодействия. В реальном процессе такое наложение возможно и в пространстве, и во времени: на деформирующуюся при ударе о поверхность каплю может упасть следующая за ней капля (наложение в пространстве), взаимодействие двух контрольных капель может происходить одновременно, но в двух различных точках охлаждаемой поверхности (наложение во времени).

Для доказательства применимости модели упорядоченного взаимодействия, как правило, вводится число гомохронности

$$H_0 = \frac{1}{\sqrt[3]{NR^3}},$$

где N – массовая концентрация капель в диспергированном потоке, $1 / \text{м}^3$;

R – средний размер диспергированной капли, 10^{-3} м.

Далее рассчитывается массовая концентрация охлаждающей жидкости c , $\text{кг}/\text{м}^3$

$$c = \frac{4}{3} \pi \cdot R^3 \cdot \rho \cdot N,$$

которая не должна превосходить значений, определяемых неравенством

$$\frac{c}{\pi} \leq \frac{4}{9} H_0^{-1}.$$

Поэтому большинство экспериментальных исследований в области охлаждения высокотемпературных поверхностей диспергированной жидкостью ограничиваются исследованием теплообмена одиночной капли с поверхностью.

Наиболее подробно теплообмен одиночной капли рассмотрен в [1]. Теплосъем одиночной капли с нагретой поверхности с температурой не выше 300°C пропорционален объему (или массе) капли и распространяется на температуры поверхности выше 500°C . Однако при взаимодействии капли с высокотемпературной поверхностью практически мгновенно образуется паровой слой, который отбрасывает каплю от поверхности до того, как она успеет деформироваться. Теплосъем капли при этих условиях не будет пропорционален ее объему.

Методики исследования теплообмена капли с нагретой поверхностью разделяются на нестационарные и калориметрические, причем в нестационарных методиках теплосъем капли определяется косвенным образом через замеры температур во внутренних точках тела, на которую падает капля. Обе методики требуют особо тщательно поставленного эксперимента. Предлагаемая методика является нестационарной, но более простой в осуществлении.

Взаимодействие капли с поверхностью рассматривается как одномоментный акт, т.е. капля налетает на поверхность и почти мгновенно взаимодействует с ней. При этом капля частично испаряется с отбором теплоты от поверхности, а неиспарившаяся часть жидкости удаляется с поверхности теплообмена.

В этом случае, процесс теплообмена капли с поверхностью пластины можно рассматривать как мгновенный сток теплоты в одной точке. Математически задача теплопроводности в металле имеет вид:

$$\frac{\partial t(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = a \nabla^2 t(x, y, z, \tau) - W \cdot \delta(x, y, z, \tau), \quad (1)$$

где $t(x, y, z, \tau)$ – трехмерное температурное поле металла; x, y, z – трехмерные декартовы координаты с началом отсчета в точке взаимодействия капли с поверхностью; ось z направлена по нормали к поверх-

ности; τ – время, отсчитываемое с момента взаимодействия капли с поверхностью;

$$W = Q_k / c\rho,$$

где Q_k – количество теплоты, унесенное каплей; c – теплоемкость металла; ρ – плотность металла; $\delta(x, y, z, \tau)$ – трехмерная функция Дирака; $\alpha = \lambda / c\rho$ – коэф-

фициент температуропроводности; λ – коэффициент теплопроводности металла.

Пусть капля налетает на пластину, толщина s которой мала. В этом случае пластину можно считать практически двухмерной

$$\frac{\partial t}{\partial z} = 0.$$

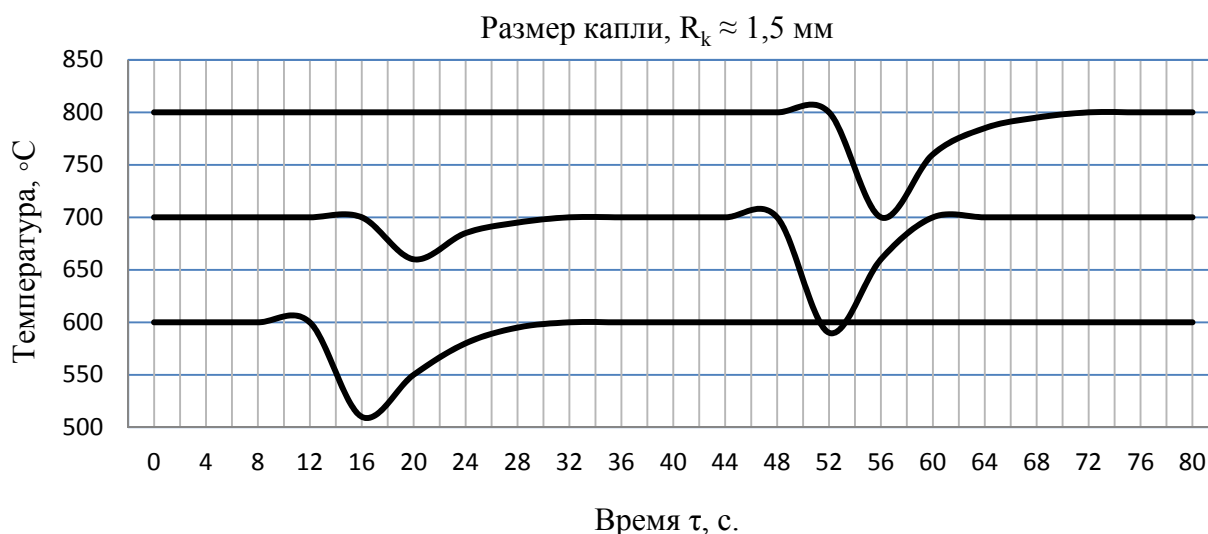
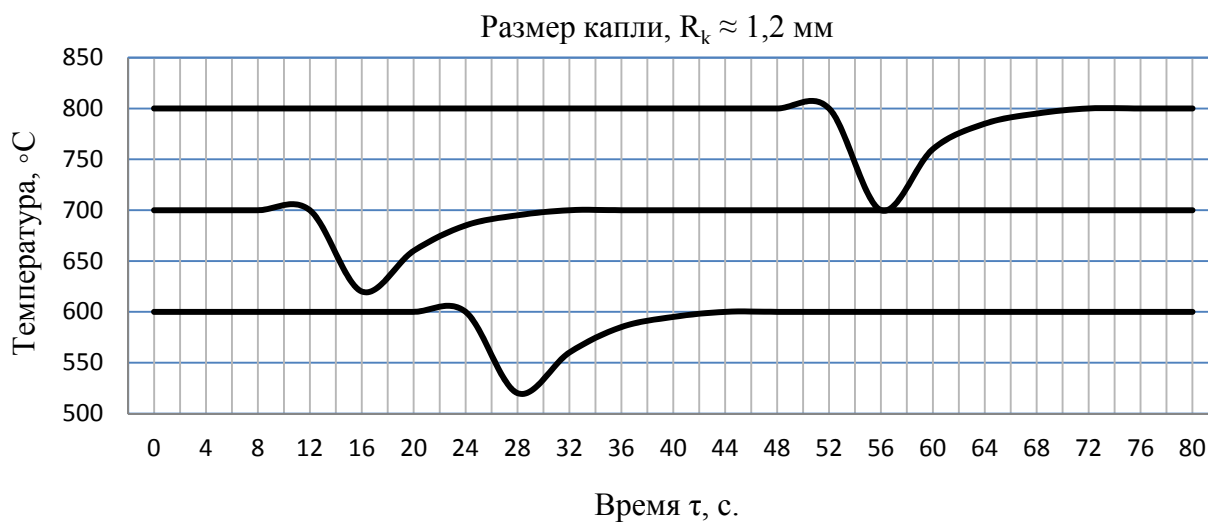
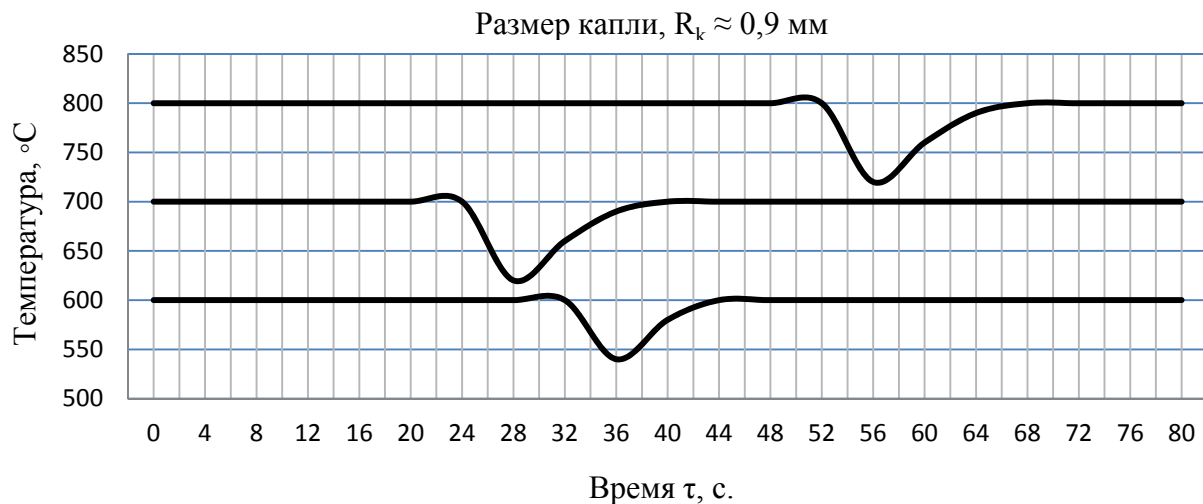


Рис. 1. Изменение температуры поверхности в месте падения капли

Поэтому уравнение (1) можно записать в виде:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right) - \left(\frac{W}{s} \right) \delta(x, y, \tau),$$

где $t = t(x, y, z)$ и $\delta = \delta(x, y, \tau)$ – двумерные функции.

В начальный момент времени температура во всех точках пластины одинакова и равна $t_0 = t(x, y, 0)$.

В качестве граничных условий возьмем отсутствие теплообмена на обеих поверхностях пластины, а саму пластину будем считать бесконечной. Из-за того, что в одной точке пластины происходит мгновенный сток тепла, температура в этой точке мгновенно понижается, а затем восстанавливается до прежнего значения за счет теплопроводности в пластине (рис. 1).

Решением поставленной задачи в цилиндрических координатах будет следующее температурное поле [1]

$$t(r, \tau) = t_0 - \frac{Q_k}{c \cdot \rho \cdot s} \cdot \frac{1}{4\pi \tau} \exp\left(-\frac{r^2}{4a\tau}\right), \quad (2)$$

где $t(r, \tau)$ – температура пластины в момент τ на расстоянии r от точки стока тепла. В частности, при $r = 0$ температура будет изменяться как

$$t(0, \tau) = t_0 - \frac{Q_k}{\lambda \cdot s} \cdot \frac{1}{4\pi\tau}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что, если известна температура пластины в точке $r = 0$ в момент времени $\tau > 0$, то тепло Q_k , унесенное каплей, можно определить из выражения

$$Q_k = 4\pi \cdot \tau \cdot \lambda \cdot s \cdot (t_0 - t(0, \tau)). \quad (4)$$

Для использования (4) при обработке экспериментальных данных необходимо обеспечить соответствующие граничные условия на поверхностях пластины, рациональным образом выбрать толщину s пластины, ее линейные размеры и момент времени τ , в который производится замер температуры пластины в месте падения капли.

Поскольку процессы изменения температуры пластины за счет взаимодействия с каплей и передачи теплоты в пластине при достаточно большом λ протекают гораздо быстрее, чем изменение теплового баланса пластины при теплообмене с окружающей средой излучением и конвекцией, то решение данной задачи в виде (2) достаточно точно отражает распределение температурного поля в пластине.

Из формулы (3) следует, что в нулевой момент времени ($\tau = 0$) температура пластины в месте падения капли должна понизиться до минус бесконечности. На самом деле из-за конечных размеров капли и конечного времени взаимодействия капли с пластиной этого не произойдет, поэтому малые моменты времени следует исключить из рассмотрения.

Формула (3) описывает реальные отклонения температуры от исходной, при временах

$$\tau > \frac{d^2}{a},$$

где d – диаметр капли. Отклонения температуры от исходной будут тем больше, чем меньше толщина пластины и коэффициент теплопроводности материала пластины.

Пластину можно считать двухмерным телом, если ее температура по толщине успевает выравниваться за достаточно малое время $\tau_{\text{выр}}$, которое можно оценить из выражения

$$\tau_{\text{выр}} \approx \frac{s^2}{a}.$$

Если принять $s = 10^{-3}$ м, $a = 10^{-5}$ м²/с (сталь), то время $\tau_{\text{выр}} \approx 0,1$ с., что гораздо меньше характерного времени рассматриваемого процесса. Чем меньше толщина пластины и больше коэффициент теплопроводности, тем с большим основанием пластину можно считать двухмерным телом.

В теоретической постановке рассматриваемой задачи теплообмена капли с пластиной линейные размеры пластины принимались бесконечными. В реальном эксперименте достаточно потребовать, чтобы линейные размеры пластины были много больше диаметра капли. Время τ необходимо выбирать так, чтобы исключить влияние конечных размеров пластины и капли.

При указанных условиях методическая погрешность эксперимента по определению величины Q_k без учета погрешности определения температуры и установки термопары не превышает 1,5 %.

Для оценки влияния точности установки термопары достаточно проанализировать экспоненту в формуле (2). Если расстояние от места установки термопары и места падения капли $r < 0,2 \cdot (a\tau)^{1/2}$, то экспонента в (2) отличается от единицы не более чем на 1 %, что можно считать допустимой погрешностью. При $\tau = 1$ с., $a = 10^{-5}$ м²/с, величина $r < 1,4 \cdot 10^{-3}$ м. Если $\tau = 5$ с., то $r < 3 \cdot 10^{-3}$ м. Отсюда следует, что требования по точности установки термопары не являются очень жесткими.

Выбирая момент времени τ , в который производится замер температуры в месте падения капли, можно обеспечить необходимую точность измерения температуры, а также точность расчетной формулы (4).

Изменения температуры пластины в месте падения капли регистрировались одноканальным самозаписывающим КСП-4 с точностью $\pm 0,5$ °С. Для тарировки использовался КСП-4 с диапазоном шкалы 0÷1100 °С, точностью 4 °С. В цепь с хромель-алюмелевой термопарой последовательно включался источник постоянного напряжения, искусственно уменьшающий термо-ЭДС термопары. Тарировка КСП осуществлялась при обратной ЭДС, составлявшей около 25 мВ. Тарировочный график представлен на рисунке 2, где: t – фактическая температура, регистрируемая грубым КСП, t_l – температура, регистрируемая более точным КСП.

Таким образом, по предложенной в данной работе методике можно с достаточной для практических целей точностью определять количество теплоты, отобранной каплей в результате взаимодействия с высокотемпературной поверхностью.

При исследовании зависимости теплосъема от размера капли при температурах поверхности 500, 600, 700, 800 °С, по формуле (4) получено, что отношение тепла, отведенного каплей, к квадрату ее размера остается примерно постоянным, т.е. теплосъем определяется главным образом величиной поверхности капли (рис. 3).

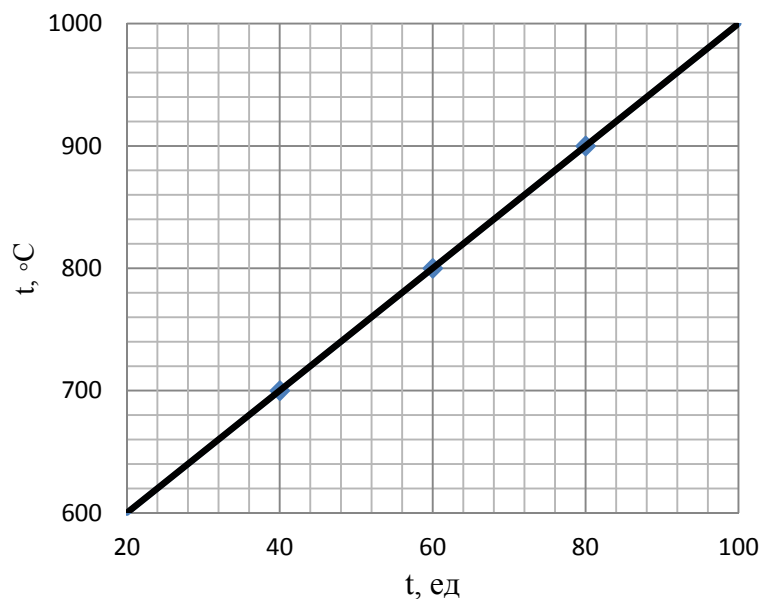


Рис. 2. Тарировочный график для определения фактической температуры

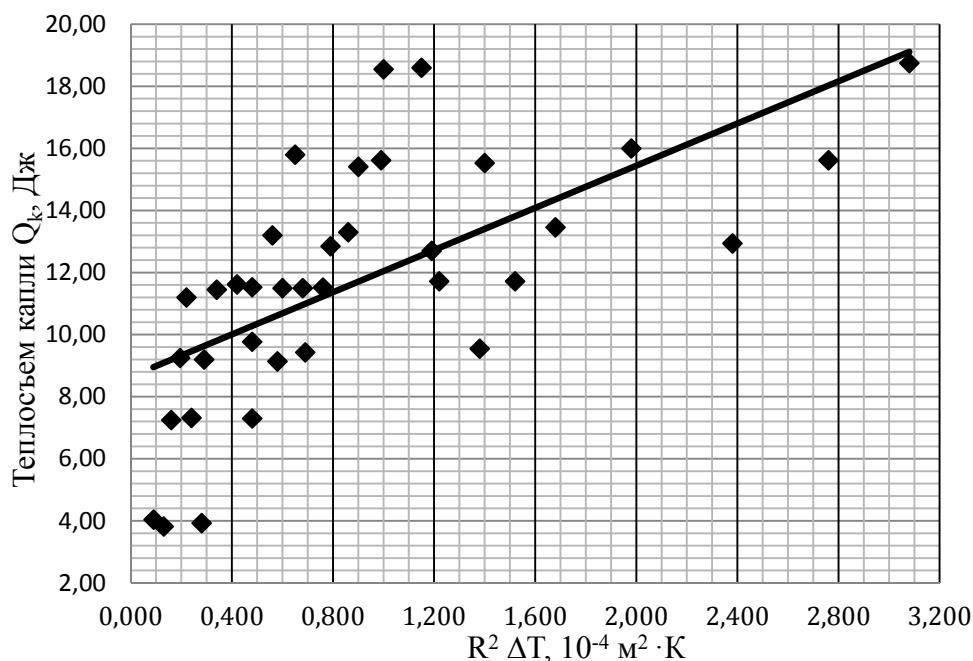


Рис. 3. Зависимость теплосъема капли от квадрата ее размера

Количество тепла, отводимого за единицу времени с единицы поверхности, описывается выражением [3]

$$q = kNR^2\omega\Delta t, \quad (5)$$

где k – коэффициент пропорциональности; Δt – разность температур жидкости и поверхности.

При некоторых условиях k почти не зависит от N , R , ω , t [3, 4]. Эти условия такие:

- температура поверхности высокая ($t > 450$ °C);
- диспергированная среда достаточно разреженная.

При экспериментальных исследованиях теплообмена капельного охлаждения коэффициент k в формуле (5) равен

$$k = \frac{Q_k}{R^2\Delta T} \approx 5,2 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Таким образом, при охлаждении высокотемпературной поверхности водяной или воздушной смесью тепловой поток, отводимый диспергированной жидкостью, пропорционален общей площади поверхности распыленной жидкости, т.е. числу капель на квадрат их среднеповерхностного радиуса.

Скорость движения капель ω_n можно найти как [5]

$$\omega_n = \frac{G}{F_\phi} \cdot \cos\beta,$$

где G – полный объемный расход воды форсунки, м³/с.; F_ϕ – площадь отверстия форсунки, м²; β – угол, под которым падают капли на поверхность (угол между нормальной составляющей и траекторией, по которой падают капли).

Учитывая, что

$$\cos\beta = \frac{H}{\sqrt{Y^2 + H^2}}$$

где H – высота от среза сопла до исследуемого сечения (охлаждаемой поверхности), м; Y – координата от оси факела до точки в исследуемом сечении струи, м, формулу (5) можно представить в виде

$$\alpha = 5200 \cdot N \cdot R_{32}^2 \cdot \frac{G}{F_{\phi} \sqrt{Y^2 + H^2}}. \quad (6)$$

Формула (6) удобна тем, что в нее входят параметры, характеризующие диспергированность струи, истекающей из форсунки NR_{32}^2 , геометрические параметры самого распылителя F_{ϕ} , и технологические (высота установки распылителя H , расход жидкости G) параметры.

Таким образом, полученную зависимость можно использовать для оперативной настройки, контроля режимов форсуночного охлаждения.

Литература

1. Лабейш, В. Г. Жидкостное охлаждение высоко-температурного металла / В. Г. Лабейш. – Ленинград : Издательство Ленинградского университета, 1983. – 172 с.
2. Владимиров, В. С. Уравнения математической физики / В. С. Владимиров. – Москва : Наука, 1981. – 512 с.
3. Калягин, Ю. А. Тепловые процессы в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок / Ю. А. Калягин, Н. А. Бормосов, С. В. Лукин. – Череповец : ЧГУ, 2005. – 168 с.
4. Бормосов, Н. А. Инженерный эксперимент при исследовании тепловых и теплообменных процессов в технологических установках: учебное пособие / Н. А. Бормосов. – Вологда : ВоГУ, 2020. – 79 с.
5. Пехович, А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Ленинград : Энергия. Ленинградское отделение, 1976. – 351 с.

N.A. Bormosov, A.Yu. Belyanina, T.A. Kochkareva
Vologda State University

RESEARCH OF HEAT EXCHANGE DURING HIGH-TEMPERATURE SURFACE COOLING

The aim of the study is to obtain a method for calculating heat transfer during cooling of a high-temperature surface with flat-plate nozzles. The authors used a nonstationary research technique to study the heat transfer between a drop and a heated surface. Experimental dependences of the drop heat removal depending on their size are obtained.

Cooling, heat transfer, high-temperature surface, ordered interaction, non-stationary research technique, temperature field, three-dimensional Dirac function.



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ГУММИРОВОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ

Проведены экспериментальные исследования теплообмена при охлаждении гуммированного изделия. В качестве основных (первичных) факторов, влияющих на качество готовых обкладок, приняты температура обработки T , продолжительность термообработки τ , толщина металлического слоя $\delta_{ст}$ и обкладки $\delta_{об}$. Исследованиями установлено, что при повышенных температурах вулканизирующей среды значительно сокращается общее время вулканизации обкладок и необходимо учитывать влияние тепловых эффектов вулканизации, чтобы не произошло порообразования и деструкции полимера в вулканизате.

Температурное поле, режим вулканизации, гуммировочное покрытие, температура обработки, псевдооживленный инертный теплоноситель, толщина покрытия, планирование эксперимента.

При изготовлении и эксплуатации резинометаллических изделий наличие клеевых соединений между гуммировочным покрытием и металлом, а также между слоями покрытия вносит особенности в формирование температурных полей [1, 3, 4, 5].

Процесс вулканизации обкладок гуммированных объектов – один из наиболее сложных тепловых процессов, протекающих в изменяющихся во времени тепловых потоках и теплообмене между теплоносителем и нагреваемым объектом, зависящих от нестационарного распределенного поля температур в вулканизуемом объекте [4, 5].

Выбор режима вулканизации основан на анализе температурных полей в резинометаллическом изделии и на объективной оценке результатов их воздействия на процесс вулканизации [6].

Определение температурного поля листового резинометаллического изделия при вулканизации в псевдооживленном инертном теплоносителе и методом простой конвекции измерением температуры одновременно в нескольких точках объема эластомера проведено на установке периодического действия [6].

На процесс вулканизации обкладок в инертном зернистом теплоносителе влияет большое количество факторов (температура термообработки, продолжительность вулканизации, толщина металлического слоя, толщина обкладки, состав и технологические свойства резиновых смесей, скорость оживающего агента и др.), и проверить на опыте все возможные сочетания этих факторов практически невозможно из-за их большого количества. В связи с этим при проведении экспериментов использовали методику рационального планирования эксперимента [1, 4, 5]. В качестве основных (первичных) факторов, влияющих на качество готовых обкладок, приняты температура обработки T , продолжительность термообработки τ , толщина металлического слоя $\delta_{ст}$ и обкладки $\delta_{об}$. На рисунке 1 приведен пример планирования

опытов по вулканизации обкладок для четырех факторов и четырех вариантов из них.

Изменение температуры в массиве резиновой обкладки, в стальном слое и окружающей среде контролировали электронными потенциометрами типа КВТ. Измерения температур проводили с помощью хромель-копелевых термопар ХК. Расчет погрешности измерений термопарами из-за потерь теплоты через термопару термоотводом, из-за охлаждения измеренного участка изделия и нагрева термопары проводили по методике, описанной в работе [6]. Продолжительность испытаний определяли временем достижения установившегося теплового состояния, когда температуры во всех контролируемых точках стабилизировались.

Такое состояние соответствовало тепловому равновесию резинометаллического образца и характеризовало начало наиболее теплонапряженного режима вулканизуемых обкладок. Термопары устанавливали перед вулканизацией между слоями, на стыке соседних слоев эластомеров и на стыке обкладок с металлическим слоем.

В зависимости от состава эластомера, толщины обкладки и стального слоя, условий термообработки установившийся режим наступал через 780...2400 с. На рисунке 2 представлены результаты изменения температуры в обкладках марки 1814+1976 на основе синтетического бутадиенового каучука СКБ. Очевидно, что температурное поле в резинометаллическом образце ассиметрично относительно оси симметрии обкладки. В начале процесса вулканизации покрытий из-за малой теплопроводности резины возникает значительный перепад температуры между поверхностью изделия и его серединой. Наиболее высокую температуру внутри образца в этот момент времени наблюдали в наружных слоях: стальном слое и внешнем слое обкладки из резины марки 1976 на основе каучука СКБ, самую низкую температуру в начальный период вулканизации – в подслое из эбонита, примыкающем к стальному слою.

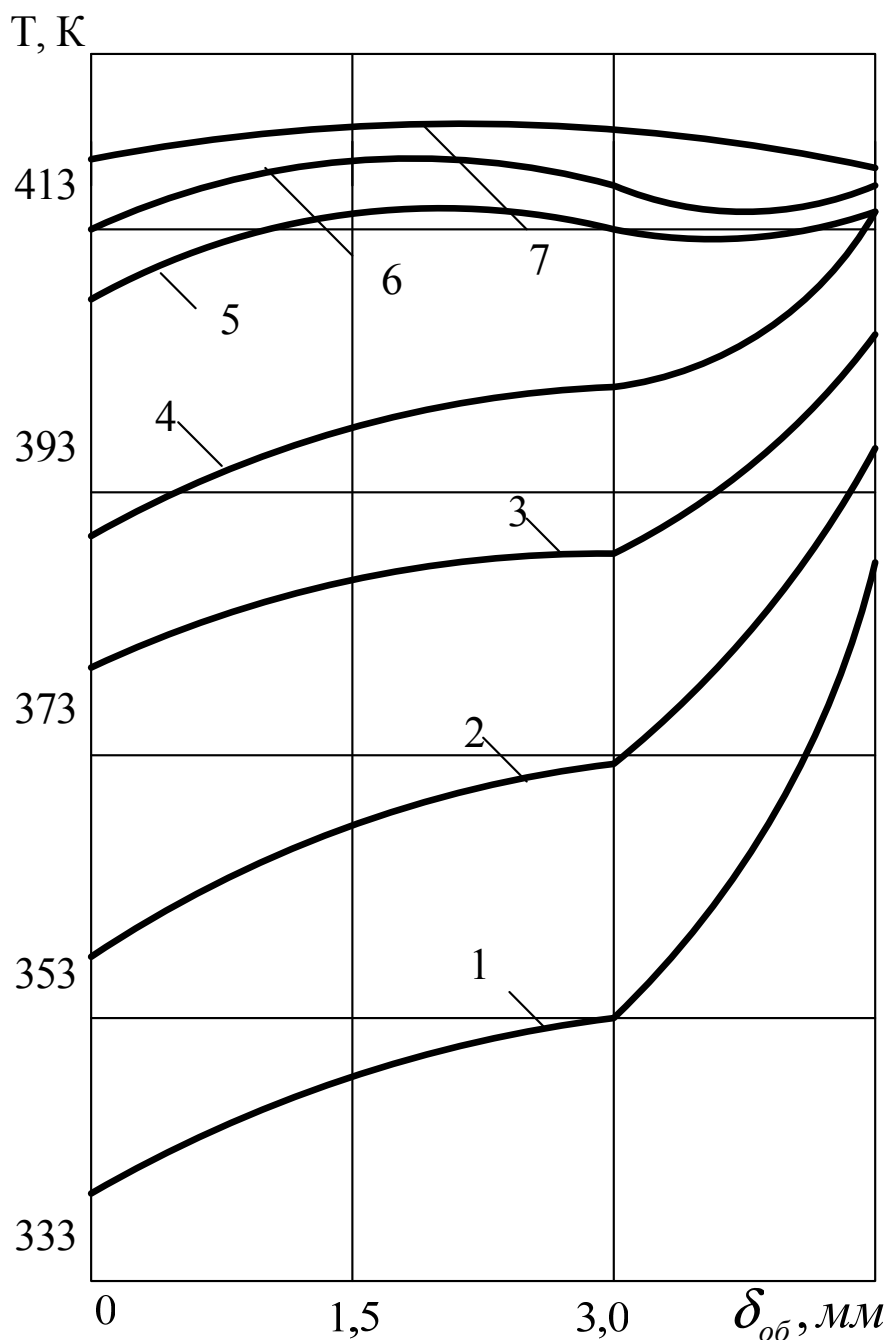


Рис. 2. Кривые распределения температуры в покрытии марки 1814 (СКБ) + два слоя 1976 (СКБ) при $\delta_{об} = 2$ мм и $T_c = 418$ К и различном времени вулканизации: 1 – 90 с.; 2 – 150 с.; 3 – 240 с.; 4 – 300 с.; 5 – 780 с.; 6 – 900 с.; 7 – 1400 с.

Особенно это заметно при высоких температурах вулканизации (выше 428 К). Результаты экспериментов по вулканизации покрытий марок 1814 + 2566 и 1752 при толщине стальной основы 2 мм показали, что время установления теплового состояния, при котором температура во всех контролируемых точках равна температуре среды ($T_c = 418$ К), растет с увеличением толщины покрытия.

Исследования по определению времени прогрева покрытий марок 1814 (СКБ) + четыре слоя 2566 (НК + СКБ) и четыре слоя 1752 (НК + СКБ) показали, что

время достижения установившегося теплового состояния обкладок ($T_c = 423$ К) растет также с увеличением толщины металлического слоя.

Однако влияние геометрических параметров покрытий на прогрев резиноталлических изделий с резиновыми и эбонитовыми обкладками неодинаково: указанные факторы больше влияют на прогрев резиновых обкладок. С повышением температуры инертного зернистого теплоносителя уменьшается время прогрева резиноталлического изделия, что влияет на скорость вулканизации обкладок.

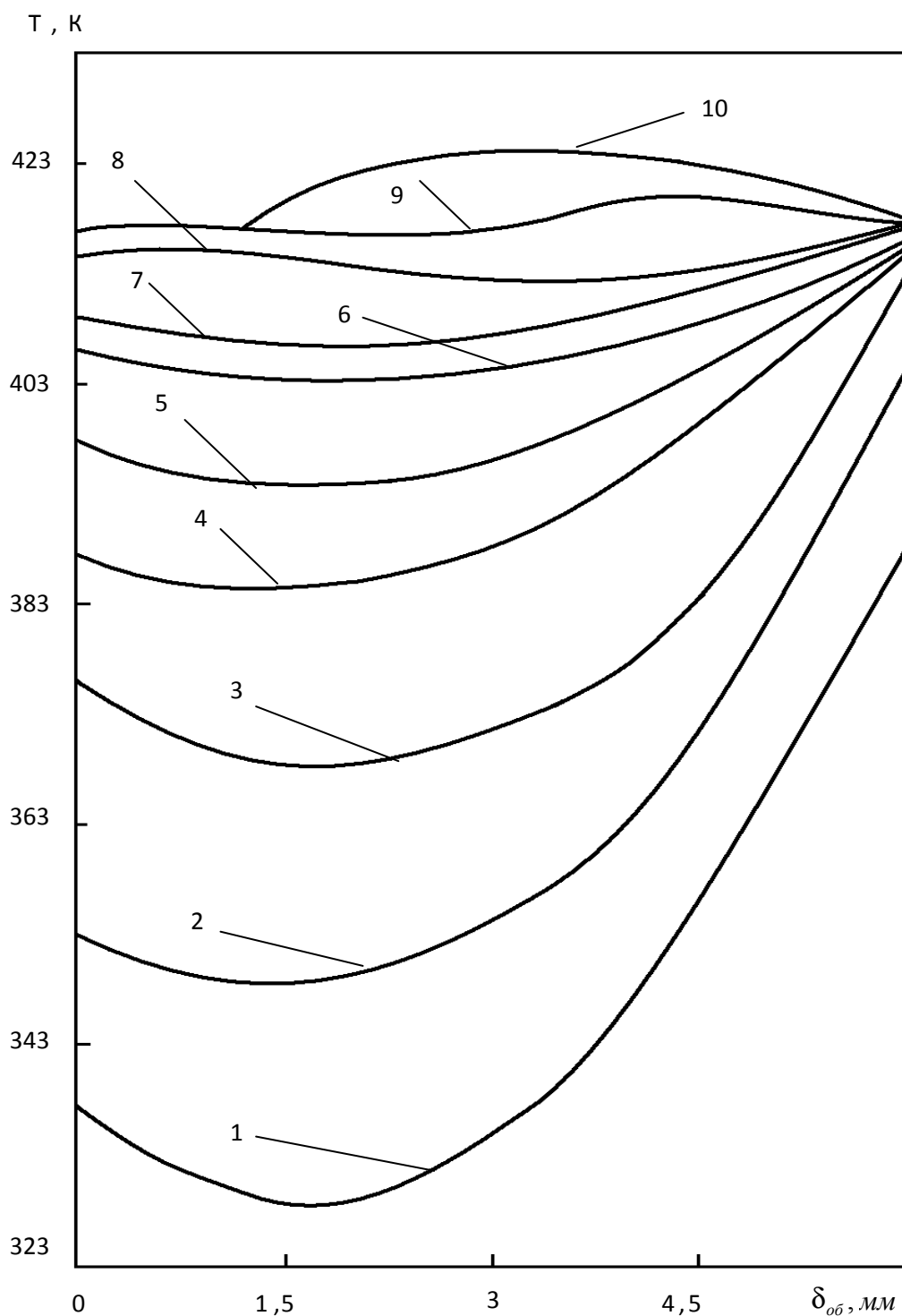


Рис. 3. Кривые распределения температуры в четырехслойном покрытии марки 1752 (НК + СКБ) при $\delta_{об} = 2$ мм и $T_c = 418$ К и различном времени вулканизации: 1 – 30 с.; 2 – 60 с.; 3 – 120 с.; 4 – 180 с.; 5 – 240 с.; 6 – 360 с.; 7 – 600 с.; 8 – 720 с.; 9 – 1530 с.; 10 – 1800 с.

Таким образом, при повышенных температурах вулканизирующей среды значительно сокращается общее время вулканизации обкладок и необходимо учитывать влияние тепловых эффектов вулканизации, чтобы не произошло порообразования и деструкции полимера в вулканизате.

Литература

1. Аваев, А. А. Температурное поле резинометаллического изделия в процессе вулканизации его эластомерной обкладки / А. А. Аваев, Ю. Р. Осипов // Инженерно-физический журнал. – 1978. – Т. 35, № 3. – С. 550.

2. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Наука, 1971. – 283 с.
3. Лукомская, А. И. Тепловые основы вулканизации резиновых изделий / А. И. Лукомская, П. Ф. Баденков, Л. М. Кеперша. – Москва : Химия, 1972. – 359 с.
4. Осипов, Ю. Р. Физико-математический анализ тепловых режимов термообработки гуммировочных покрытий / Ю. Р. Осипов, Т. А. Рожина // Техника и технология. – 2005. – № 3 (9). – С. 51–54.
5. Осипов, Ю. Р. Решение краевой задачи нестационарной теплопроводности при предварительной обработке многослойных эластомерных материалов / Ю. Р. Осипов, Т. А. Рожина, С. Ю. Осипов // Конструкции из композиционных материалов. – 2005. – № 6 – С. 35–40.
6. Осипов, Ю. Р. Термообработка и работоспособность покрытий гуммированных объектов / Ю. Р. Осипов. – Москва : Машиностроение, 1995. – 232 с.
7. Осипова, В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена / В. А. Осипова. – Москва : Энергия, 1979. – 320 с.

N.A. Bormosov, T.A. Kochkareva
Vologda State University

HEAT EXCHANGE RESEARCH WHEN COOLING RUBBER COATING

The experimental study of heat exchange when cooling rubber products has been conducted. The main (primary) factors, which influence the quality of ready coatings, have been considered to be processing temperature T , heat processing time τ , the thickness of metal layer $\delta_{ст}$ and coating $\delta_{об}$. The study has shown that when the temperature of vulcanizing environment rises, the total time of vulcanization of coatings reduces significantly and the impact of heat effects of vulcanization shall be taken into consideration to avoid pore formation and destruction of a polymer in vulcanizate.

Temperature field vulcanization regime, rubber coating, processing temperature, fluidized inert heat carrier, coating thickness, experiment planning.



НАЛОЖЕНИЕ ВРАЩЕНИЙ В МЕХАНИЗМАХ

В статье представлен кинематический анализ механизма со сложением вращательного синхронного движения. Разработана математическая модель сложного движения, обоснована ее достоверность. Рассмотрены различные варианты смешанного вращательного движения. Представлены практические рекомендации по применению результатов.

Координаты, вращение, вектор, годограф, эллипс, окружность, улитка.

В ряде механизмов используется синхронное наложение вращений. Кинематика этого процесса изучена недостаточно. В то же время понимание закономерностей в подобных системах необходимо на этапе разработки и проектирования. Ниже рассмотрены кинематические схемы и их кинематический анализ.

Если система отсчета $x'O'y'$ движется прямолинейно и равномерно со скоростью v_1 в неподвижной системе отсчета xOy и точка a движется прямолинейно и равномерно со скоростью v_2 в системе отсчета $x'O'y'$, то в соответствии с принципом относительности Галилея точка a движется прямолинейно и равномерно со скоростью v_3 в системе отсчета xOy , а годографом вектора A , соединяющего точки O и a , является прямая линия (рис. 1) [1].

Цель работы – установить, как в подобной ситуации обстоит дело при сложении *вращательных* синхронных движений [2–4].

Практический аспект темы определяется тем, что во многих механизмах, таких как мультиинертный осциллятор [5–9], планетарные передачи [10], приводы фрез в машинах для очистки труб больших диа-

метров и т.п., реализуется суммирование вращательных движений, и форма годографа является полезной информацией при проектировании подобных устройств.

Пусть точка O' вращается вокруг точки O в системе отсчета xOy с постоянной угловой скоростью ω . Расстояние ρ_1 между точками не меняется. Координатные оси обеих систем отсчета всегда попарно параллельны. Точка a вращается вокруг точки O' в системе отсчета $x'O'y'$ с постоянной угловой скоростью $-\omega$ или $+\omega$. Расстояние ρ_2 между точками не меняется.

При разнонаправленном вращении точек a и O' годографом вектора A является эллипс.

Координаты точки O' в системе xOy :

$$x_1 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1), \quad y_1 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1). \quad (1)$$

Координаты точки a в системе $x'O'y'$:

$$x_2 = \rho_2 \cos(-\omega t + \varphi_2), \quad y_2 = \rho_2 \sin(-\omega t + \varphi_2).$$

Здесь φ_1, φ_2 – начальные углы.

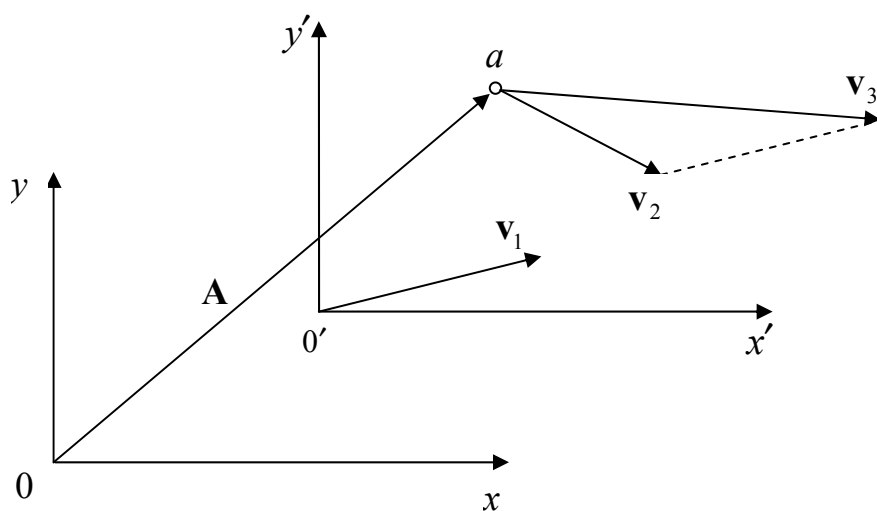


Рис. 1. Сложение движений

Координаты вектора А в системе xOy :

$$x = x_1 + x_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \cos(-\omega t + \varphi_2),$$

$$y = y_1 + y_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \sin(-\omega t + \varphi_2).$$

$$x = \cos \omega t (\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2) - \sin \omega t (\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2),$$

$$y = \sin \omega t (\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2) + \cos \omega t (\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2).$$

Отсюда следует:

$$\sin \omega t = \frac{y(\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2)}{\rho_1^2 - \rho_2^2} - \frac{x(\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2)}{\rho_1^2 - \rho_2^2},$$

$$\cos \omega t = \frac{x(\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2)}{\rho_1^2 - \rho_2^2} + \frac{y(\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2)}{\rho_1^2 - \rho_2^2}.$$

$$\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1,$$

$$\frac{y^2(\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2)^2 + x^2(\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2)^2}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} -$$

$$- \frac{2xy(\rho_1 \cos \varphi_1 + \rho_2 \cos \varphi_2)(\rho_1 \sin \varphi_1 + \rho_2 \sin \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} +$$

$$+ \frac{x^2(\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2)^2 + y^2(\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2)^2}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} +$$

$$+ \frac{2xy(\rho_1 \cos \varphi_1 - \rho_2 \cos \varphi_2)(\rho_1 \sin \varphi_1 - \rho_2 \sin \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1,$$

$$\frac{x^2[\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} +$$

$$+ \frac{y^2[\rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} - \frac{4xy\rho_1\rho_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1. \quad (2)$$

Это уравнение эллипса.

Большая и малая полуоси эллипса (2) соответственно равны $(\rho_1 + \rho_2)$ и $|\rho_1 - \rho_2|$.

Обратным отсчетом времени можно добиться, чтобы $\varphi_1 = \varphi_2$, а поворотом координатных осей – чтобы $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$. Тогда (2) примет вид

$$\frac{x^2(\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} + \frac{y^2(\rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1,$$

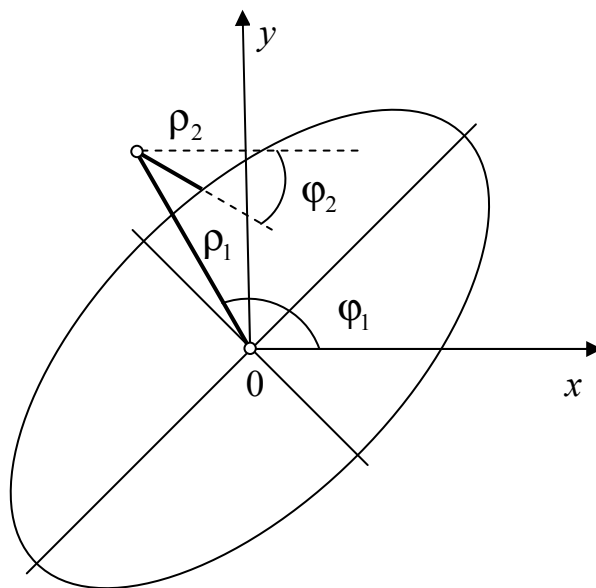


Рис. 2. Эллиптический годограф

$$\frac{x^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} + \frac{y^2}{(\rho_1 - \rho_2)^2} = 1 \quad (3)$$

(канонический вид).

Следствие 1. При $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ эллипс (2) вырождается в отрезок прямой линии длиной 4ρ .

Следствие 2. Корни характеристического уравнения эллипса равны

$$\lambda_1 = (\rho_1 + \rho_2)^2, \quad \lambda_2 = (\rho_1 - \rho_2)^2.$$

Следствие 3. Эксцентриситет эллипса равен отношению среднегеометрического значения величин ρ_1 и ρ_2 к их среднеарифметическому значению:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\rho_1\rho_2}}{(\rho_1 + \rho_2)/2}.$$

Следствие 4. Фокусы эллипса (для канонической формулы (3)) равны

$$f_{1,2} = (\pm 2\sqrt{\rho_1\rho_2}, 0).$$

Оси эллиптического годографа повернуты на угол $(\varphi_1 + \varphi_2)/2$ в системе отсчета xOy .

При повороте координатных осей на угол $(\varphi_1 + \varphi_2)/2$ выражение (3) принимает вид:

$$\frac{\left(x \cos \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + y \sin \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)^2}{(\rho_1 + \rho_2)^2} + \frac{\left(-x \sin \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} + y \cos \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)^2}{(\rho_1 - \rho_2)^2} = 1,$$

$$\frac{x^2[\rho_1^2 + \rho_2^2 - 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} +$$

$$+ \frac{y^2[\rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2)]}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} - \frac{4xy\rho_1\rho_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2)}{(\rho_1^2 - \rho_2^2)^2} = 1,$$

что совпадает с (2).

На рисунке 2 $\varphi_1 = 120^\circ$, $\varphi_2 = -30^\circ$, следовательно, оси эллипса повернуты на 45° .

Обратным ходом рассуждений доказывается:

Если годографом вектора A является эллипс с полуосями $(\rho_1 + \rho_2)$ и $|\rho_1 - \rho_2|$, то точка a вращается вокруг точки O' с постоянной угловой скоростью $-\omega$ в системе отсчета $x'O'y'$.

При однонаправленном вращении точек a и O' годографом вектора A является окружность с центром в точке O .

Координаты точки O' в системе xOy определяются выражением (1).

Координаты точки a в системе $x'O'y'$:

$$x_2 = \rho_2 \cos(\omega t + \varphi_2), \quad y_2 = \rho_2 \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Координаты вектора A в системе xOy :

$$x_A = x_1 + x_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \cos(\omega t + \varphi_2),$$

$$y_A = y_1 + y_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \sin(\omega t + \varphi_2).$$

Квадрат вектора A равен

$$\begin{aligned} A^2 = x_A^2 + y_A^2 = & \rho_1^2 \cos^2(\omega t + \varphi_1) + \\ & + \rho_2^2 \cos^2(\omega t + \varphi_2) + 2\rho_1\rho_2 \cos(\omega t + \varphi_1) \cos(\omega t + \varphi_2) + \\ & + \rho_1^2 \sin^2(\omega t + \varphi_1) + \rho_2^2 \sin^2(\omega t + \varphi_2) + \\ & + 2\rho_1\rho_2 \sin(\omega t + \varphi_1) \sin(\omega t + \varphi_2) = \\ & \dots \\ = & \rho_1^2 + \rho_2^2 + 2\rho_1\rho_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2). \end{aligned}$$

Длина вектора A неизменна, следовательно, его годографом является окружность.

Следствие. Вектор A вращается с угловой скоростью ω в системе отсчета xOy .

Это вытекает из того, что форма треугольника $OO'a$ неизменна, а его сторона OO' вращается с угловой скоростью ω .

Обратным ходом рассуждений доказывается:

Если годографом вектора A является окружность, то точка a вращается вокруг точки O' с постоянной угловой скоростью $+\Omega$ в системе отсчета $x'O'y'$.

Если точка a неподвижна в системе отсчета $x'O'y'$, то годографом вектора A является окружность радиуса ρ_1 , координаты центра которой в системе отсчета xOy равны $x_{\rho_1} = \rho_2 \cos \varphi_2$, $y_{\rho_1} = \rho_2 \sin \varphi_2$.

Координаты точки O' в системе xOy определяются выражением (1).

Координаты точки a в системе $x'O'y'$:

$$x_2 = \rho_2 \cos \varphi_2, \quad y_2 = \rho_2 \sin \varphi_2.$$

Координаты вектора A в системе xOy :

$$x_A = x_1 + x_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \cos \varphi_2,$$

$$y_A = y_1 + y_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + \rho_2 \sin \varphi_2,$$

$$x_A - \rho_2 \cos \varphi_2 = \rho_1 \cos(\omega t + \varphi_1),$$

$$y_A - \rho_2 \sin \varphi_2 = \rho_1 \sin(\omega t + \varphi_1),$$

$$(x_A - \rho_2 \cos \varphi_2)^2 + (y_A - \rho_2 \sin \varphi_2)^2 = \rho_1^2.$$

Теорема доказана.

Пример сложения кратных вращений. Пусть точка a вращается вокруг точки O' в системе отсчета $x'O'y'$ с постоянной угловой скоростью $+2\omega$ и $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$.

Координаты точки O' в системе xOy :

$$x_1 = \rho_1 \cos \omega t, \quad y_1 = \rho_1 \sin \omega t.$$

Координаты точки a в системе $x'O'y'$:

$$x_2 = \rho_2 \cos 2\omega t, \quad y_2 = \rho_2 \sin 2\omega t.$$

Координаты вектора A в системе xOy :

$$x_A = \rho_1 \cos \omega t + \rho_2 \cos 2\omega t,$$

$$y_A = \rho_1 \sin \omega t + \rho_2 \sin 2\omega t.$$

Годограф вектора A (улитка) при $\rho_1 = \rho_2$ изображен на рисунке 3.

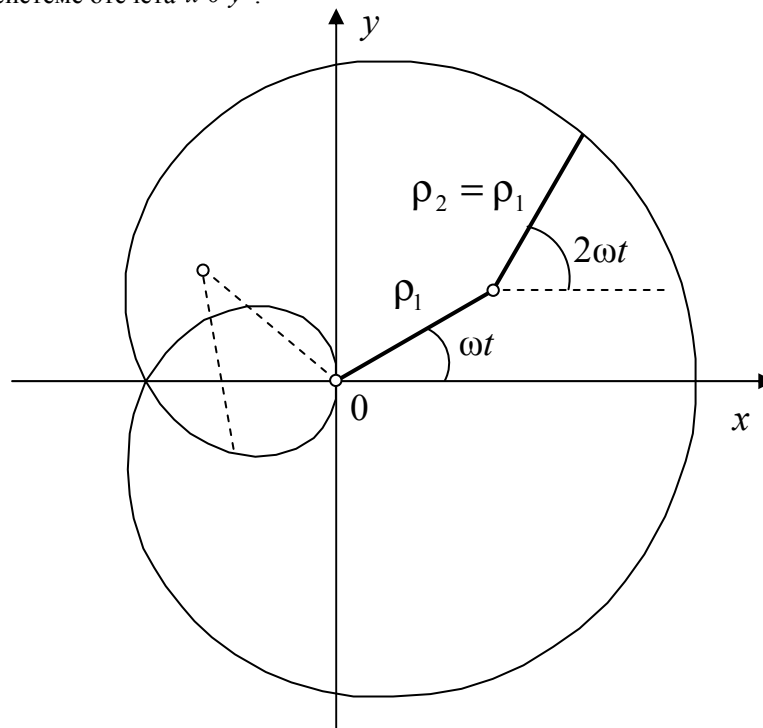


Рис. 3. Улиточный годограф

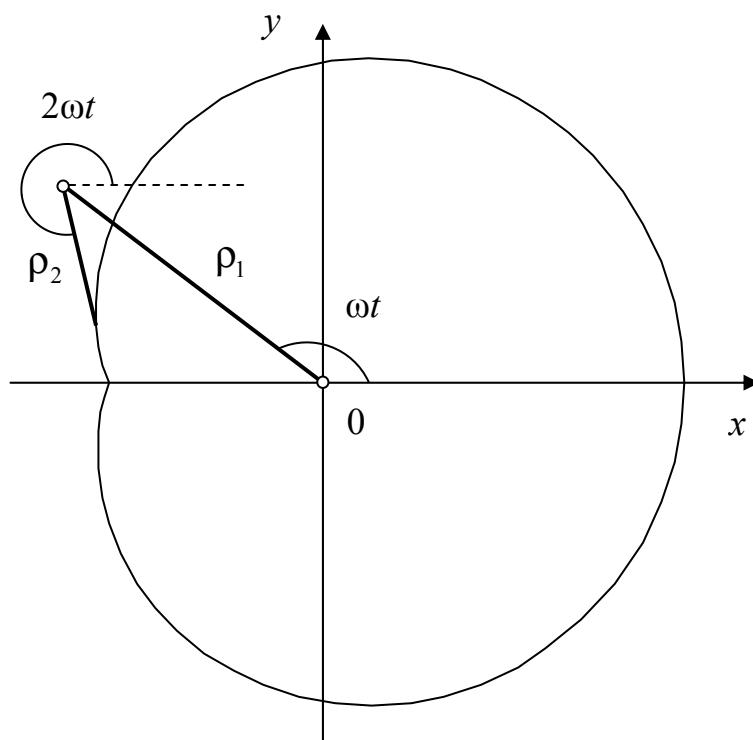


Рис. 4. Улиточный годограф без петли

Уравнение этой улитки в полярных координатах имеет вид:

$$\rho = \rho_1 \sqrt{2 + 2 \cos \frac{2}{3} \varphi}.$$

Для сравнения формула улитки Паскаля, имеющей заметное внешнее сходство, –

$$\rho = b + a \cos \varphi.$$

Условием возникновения петли улиточного годографа является неравенство

$$\rho_1 \sin \omega t < \rho_2 \sin 2\omega t,$$

$$\rho_1 \sin \omega t < \rho_2 2 \sin \omega t \cos \omega t,$$

$$\rho_1 < 2\rho_2 \cos \omega t.$$

При $\rho_1 \geq 2\rho_2$ петля не возникает (рис. 4).

Подобно тому, как результатом сложения двух равномерных прямолинейных движений является также равномерное прямолинейное движение, результатом сложения двух равномерных однонаправленных круговых движений является также равномерное круговое движение.

Годографом при сложении двух равномерных противоположно направленных круговых движений является эллипс.

При сложении двух несинхронных вращений возможны годографы в виде улитки.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании механизмов, реализующих сложные вращательные движения. При разработке техники различного назначения все в большей степени используются САПР и цифровые технологии. В этих условиях исходные данные для проектирования необходимо задавать в виде математических формул. Полученные соотношения такую возможность предоставляют.

Литература

1. Попов, И. П. Выбор систем отсчета в задачах управления движущимися инертными объектами / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 1 (3). – С. 20–22.
2. Бранец, В. Н. Об изоморфизме математических описаний операции вращения / В. Н. Бранец // Известия РАН. МТТ. – 2018. – № 2. – С. 136–143.
3. Бычков, Ю. П. О катании тела с ротором по подвижной опорной сфере / Ю. П. Бычков // ПММ. – 2015. – Т. 79, вып. 1. – С. 99–111.
4. Попов, И. П. Использование реактивного момента электромагнитного маховика для изменения положения объектов в пространстве / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 3 (5). – С. 75–77.
5. Попов, И. П. Построение вибрационных сортировальных машин по схеме мультиинертного осциллятора / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2020. – № 3 (9). – С. 14–17.
6. Попов, И. П. Использование инертного триплетного маятника в вибрационных сортировальных машинах / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2020. – № 3 (9). – С. 11–13.
7. Попов, И. П. Инертная колебательная система из двух грузов для вибрационных механизмов / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2020. – № 2 (8). – С. 10–12.
8. Popov, I. P. Theory of a Multi-Inert Oscillator / Popov, I. P. – DOI: 10.3103/S1052618820080105 // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2020. – Vol. 49, no. 8. – P. 16–20.

9. Popov, I. P. Modeling three-inert oscillator / I. P. Popov. – DOI: 10.15593/2499-9873/2018.4.04 // Applied mathematics and control sciences. – 2018. – No. 4. – P. 73–79.

10. Приходько, А. А. Создание и исследование планетарных механизмов прерывистого движения с

эллиптическими зубчатыми колесами / А. А. Приходько, А. И. Смелягин // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение. – 2019. – № 6 (129). – С. 77–88.

I.P. Popov

Kurgan State University

SUPERPOSITION OF ROTATIONS IN MECHANISMS

The article presents a kinematic analysis of the mechanism with the addition of rotational synchronous motion. A mathematical model of complex motion has been developed, and its reliability has been substantiated. Various variants of mixed rotational motion are considered. Practical recommendations for the application of the results are presented.

Coordinates, rotation, vector, hodograph, ellipse, circle, snail.



РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОЙ 3D-МОДЕЛИ ИЗДЕЛИЯ СО СПИРАЛЬНО-СФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПЕРЕМЕННОГО ШАГА

В статье рассматривается конструкторское обеспечение проектирования и производства деталей автоматизированных поточных линий с поштучной подачей объектов производства, выполняемое на базе специализированного прикладного программного обеспечения. Результатом исследования является оригинальная методика построения цифровой 3D-модели специального изделия со спирально-сферической поверхностью переменного шага с учетом предъявляемых технологических и эксплуатационных требований к его конструкции.

3D-модель, цифровой макет, спирально-сферическая поверхность переменного шага, конструкторская и технологическая подготовка производства, инженерный анализ.

Одним из ключевых факторов развития современного машиностроительного производства является проблема качественных характеристик выпускаемых изделий, сокращение временных затрат и величины технической подготовки и максимальное удовлетворение запросов конечного потребителя. Использование систем автоматизированного проектирования (САПР) позволяет решить данные вопросы и, кроме того, существенно снижает себестоимость проектных работ.

Основными отличиями и новизной данного проекта НИОКР является применение принципов цифровых технологий в решении задачи разработки оригинальной методики построения цифровой 3D-модели специального изделия со спирально-сферической поверхностью переменного шага.

Эффективное и надежное проектирование на базе современных программных средств можно осуществить только на основе системного подхода, объединяющего на новом системном уровне известные методы анализа. Рекомендуемая последовательность: анализ физической сущности задачи, представление физической модели; анализ по аналогам; анализ приближенным ручным экспресс-расчетом; анализ приближенных и локальных моделей средствами САПР; уточненный анализ численных моделей для конечного проектирования [2].

В моделировании следует использовать ряд моделей: концептуальную, рабочую, фрагмент, интегральную и т.п. Каждая модель должна сопровождаться предварительным анализом.

Для автоматизации конструкторско-технологической подготовки производства разработано огромное количество программных средств, используемых на всех этапах подготовки. Наиболее востребованными и значимыми являются системы CAD/CAE-класса.

CAD-системы (Computer Aided Design) – компьютерная поддержка проектирования конструкций и технических объектов [2]. Именно эти системы были первыми разработаны и внедрены в процесс конструкторской подготовки производства. Основная зада-

ча на первом этапе внедрения САД-систем заключалась в замене ручного черчения двухмерных чертежей на кульмане более эффективным инструментом машинной графики. По мере наращивания мощности вычислительных средств, используемых для решения инженерных задач, в системах автоматизированного проектирования появилась возможность создавать не двухмерную проекцию, а трехмерную модель, представленную в виде визуализированного образа математической модели формы проектируемого объекта.

САЕ-системы (Computer Aided Engineering) – компьютерная поддержка инженерного анализа), как правило, реализуют универсальные подходы метода конечных элементов, с помощью которого можно проводить моделирование и численные расчеты практически любых физических полей [3, 4]. К САЕ можно отнести обширный класс подсистем, каждая из которых позволяет автоматизировать определенную инженерную задачу (класс однородных задач): от расчетов на прочность, анализа аэро-, гидро-, термодинамических процессов до моделирования функционирования машин и механизмов.

Функции САД-систем в машиностроении подразделяют на функции двухмерного (2D) и трехмерного (3D) проектирования. К функциям 2D относят черчение, оформление конструкторской документации; к функциям 3D – получение трехмерных геометрических моделей, метрические расчеты, реалистичную визуализацию, взаимное преобразование 2D- и 3D-моделей. Трехмерные модели представляют в виде описания поверхностей, ограничивающих деталь, или указанием элементов пространства, занимаемых телом детали. Модели поверхностей сложной формы получают с помощью разновидностей кинематического метода, к которым относят вытягивание заданного плоского контура по нормали к его плоскости, протягивание контура вдоль произвольной пространственной кривой, вращение контура вокруг заданной оси, натягивание поверхности между несколькими заданными сечениями.

К важным характеристикам САД-систем относятся параметризация и ассоциативность. Параметризация подразумевает использование геометрических моделей в параметрической форме, т.е. при представлении части или всех параметров объекта не константами, а переменными. Параметрическая модель, находящаяся в базе данных, легко адаптируется к разным конкретным реализациям и потому может использоваться во многих конкретных проектах. При этом появляется возможность включения параметрической модели детали в модель сборочного узла с автоматическим определением размеров детали, диктуемых пространственными ограничениями. Эти ограничения в виде математических зависимостей между частью параметров сборки отражают ассоциативность моделей.

Параметризация и ассоциативность играют важную роль при проектировании конструкций узлов и блоков, состоящих из большого числа деталей. Действительно, изменение размеров одних деталей оказывает влияние на размеры и расположение других. Благодаря параметризации и ассоциативности изменения, сделанные конструктором в одной части сборки, автоматически переносятся в другие части, вызывая изменения соответствующих геометрических параметров в этих частях.

Корректные синтез и редактирование твердотельных 3D-моделей изделий возможны с помощью нескольких методов.

Наиболее очевидный метод – задание проектировщиком изделия ограничений и условий, накладываемых на параметры модели и отражающих требования непересечения тел, соосности отверстий, компланарности, перпендикулярности и т.п.

В большинстве современных МСАД используется метод, основанный на использовании дерева построения модели. Деревом построения называют последовательность операций создания модели, упорядоченную по времени их совершения. Согласно этому методу внесение изменений в ту или иную часть модели подразумевает переход в ту вершину дерева, которая соответствует изменяемой части, и после внесения изменений повторное выполнение всех последующих операций синтеза.

Третий способ – синхронное моделирование, основанное на автоматическом определении, благодаря применению экспертных систем, тех ограничений, которые в первом методе задаются пользователем. В результате упрощается работа конструктора, не требуются затраты времени на перестроение дерева модели.

На рисунке 1 приведено изображение образца изделия, вышедшего из строя в результате износа.

На рисунке 2 изображена захватная зона шнека, на которой имеются многочисленные следы истирания и выкрашивания поверхностей. Это свидетельствует о некорректной работе изделия, очевидно, по причине несоответствия условиям эксплуатации параметров формы спиральной поверхности.



Рис. 1. Внешний вид детали



Рис. 2. Следы эксплуатационного износа в захватной зоне

Вероятно, данный образец не является штатной деталью технологического оборудования, для использования в котором предназначен.

Целью настоящей работы является корректировка формы спирально-сферической поверхности переменного шага изделия, обеспечивающая улучшение условий работы и, в итоге, создание цифровой 3D-модели данного изделия.

Наличие такой модели позволит с минимальными затратами осуществить производство таких деталей на технологическом оборудовании, оснащённом системой числового программного управления.

Винтовая линия (рис. 3) – линия, описываемая точкой M , которая вращается с постоянной угловой скоростью ω вокруг неподвижной оси (Oz) и одновременно перемещается поступательно с постоянной скоростью v вдоль этой оси.

Параметрические уравнения:

$$x = a \cos \omega t, \quad y = a \sin \omega t, \quad z = vt$$

или

$$x = a \cos \varphi, \quad y = a \sin \varphi, \quad z = b \varphi,$$

где a – радиус цилиндра, на котором расположена линия;

$$\varphi = \omega t, \quad b = v/\omega = h/2\pi;$$

где h – шаг винтовой линии.

Проекция винтовой линии на координатные плоскости:

на плоскость xOy , окружность:

$$x^2 + y^2 = a^2,$$

на плоскость yOz , синусоида:

$$y = a \sin(z/b),$$

на плоскость xOz , синусоида:

$$x = a \cos(z/b).$$

Длина винтовой линии от точки пересечения с плоскостью xOy до синусоида произвольной точки:

$$M: s = \sqrt{a^2 + b^2} t.$$

На рисунке 4 показано образование винтовой линии на поверхности цилиндра от движения точки A по образующей EC и вращательного движения этой образующей. Здесь изображено несколько положений этой образующей: E_0C_0, E_1, C_1, \dots ; при этом дуги E_0E_1, E_1E_2, \dots равны между собой и каждая равна $\pi d/n$, где d – диаметр цилиндра, а n – число делений. Начальное положение точки обозначено через A_0 , последующее – соответственно через A_1, A_2 и т.д.

Если при перемещении образующей из положения E_0C_0 в положение E_1C_1 точка займет положение A_1 , то отрезок E_1A_1 определит расстояние, которое точка прошла по образующей от своего первоначального положения. При последующем положении образующей (E_2C_2) точка поднимется на высоту $E_2A_2 = 2E_1A_1$ и т.д. Когда образующая сделает полный оборот, точка переместится по ней на расстояние $E_0A_{12} = 12E_1A_1$.

При дальнейшем вращении образующей точка A начнет образовывать второй виток, или оборот винтовой линии, занимая положения A_{11}, A_{12} и т.д.

Расстояние между точками A_0 и A_{12} называется шагом винтовой линии. Шаг может быть выбран в зависимости от тех или иных условий.

Расстояние точки A до оси 00 называется радиусом винтовой линии, а ось 00 – осью винтовой линии. Радиус винтовой линии равен половине диаметра прямого кругового цилиндра, на боковой поверхности которого располагается винтовая линия. Две величины – диаметр цилиндра и размер шага – являются параметрами, определяющими цилиндрическую винтовую линию на боковой поверхности прямого кругового цилиндра.

Можно построить на поверхности цилиндра кривую линию, образованную так же, как и винтовая линия, но вращение образующей цилиндра оставить равномерным, а перемещение точки по образующей сделать переменным по какому-либо закону. Такие кривые иногда называют винтовыми линиями с переменным шагом.

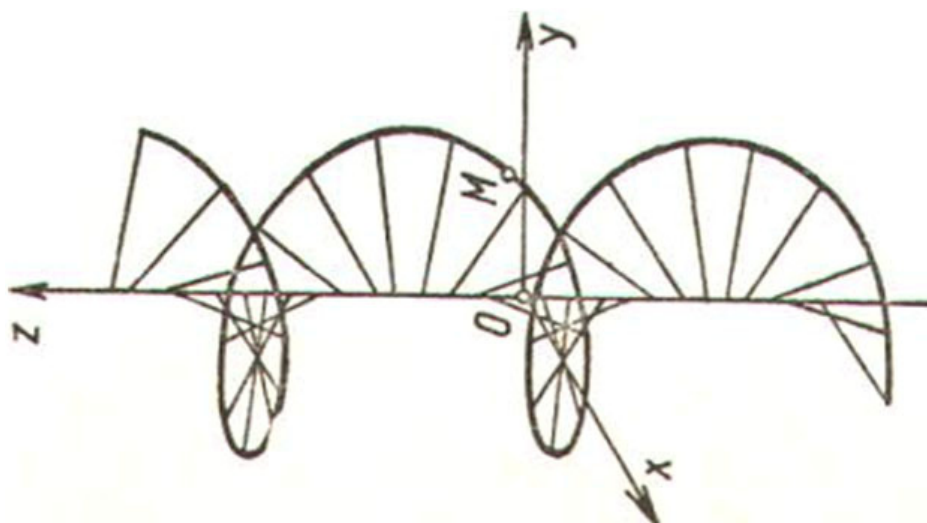


Рис. 3. Винтовая линия

Параметры линии можно задавать как в табличном виде, так и в виде уравнения движения точки. Пример представлен на рисунке 7.

В результате анализа результатов, полученных в процессе исследования конструктивных элементов изделия по образцу, разработаны принципиальные

решения для реинжиниринга, для улучшения эксплуатационных характеристик разработан вал со спирально-сферической поверхностью переменного шага, но с постоянным размером винтовой канавки. Цифровая 3D-модель спроектированного вала представлена на рисунке 8. На рисунке 9 представлен чертеж вала.

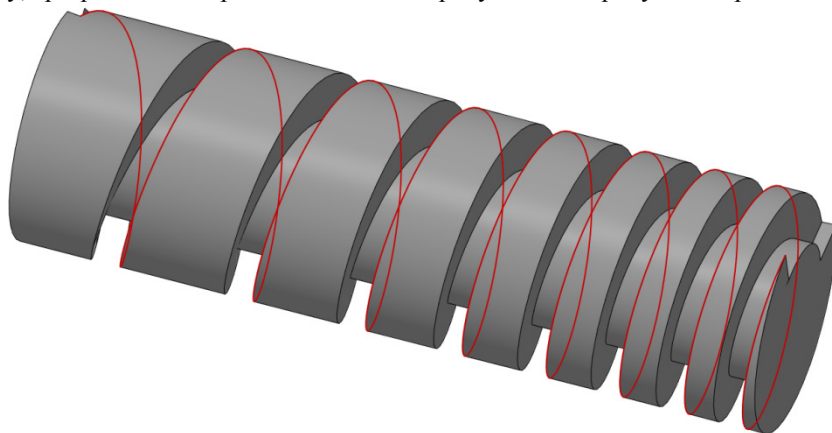


Рис. 6. 3D-модель винтовой линии с переменным шагом в САПР

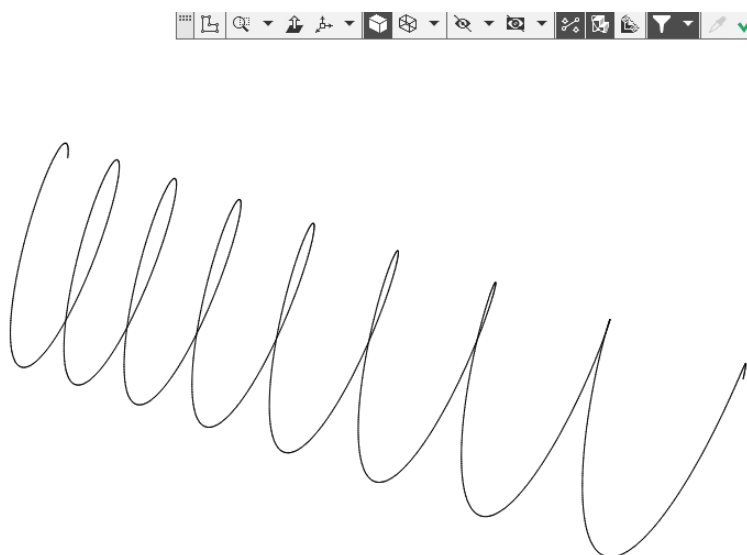
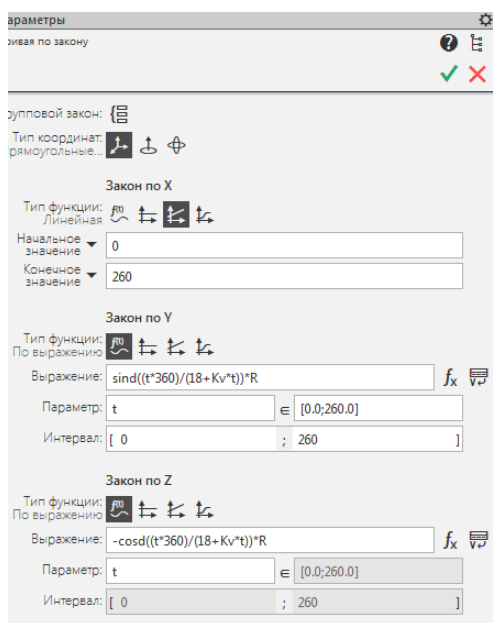


Рис. 7. Параметры 3D-модели винтовой линии с переменным шагом

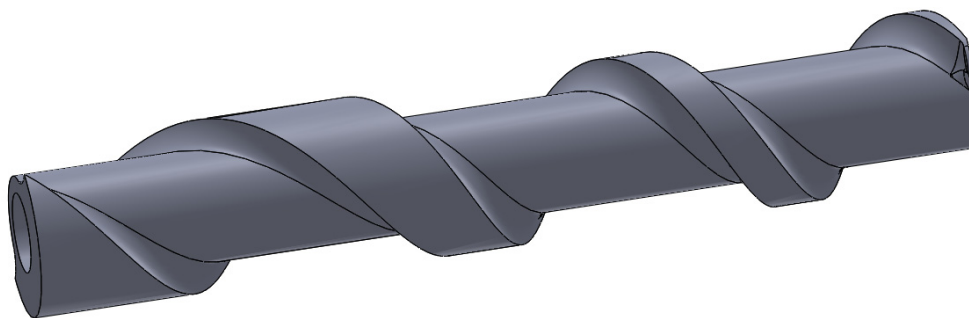


Рис. 8. 3D-модель вала шнека с переменным шагом

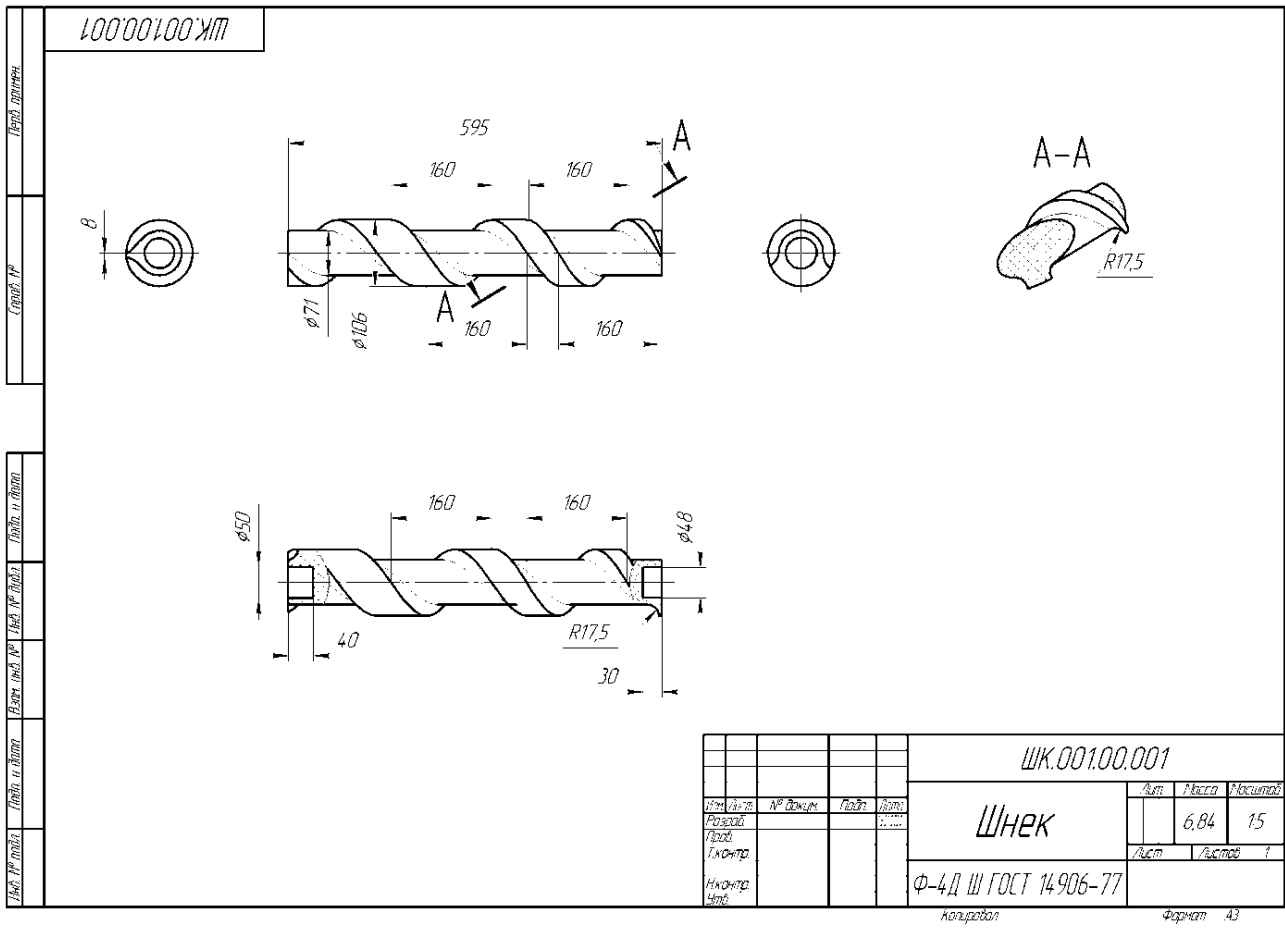


Рис. 9. Чертеж изделия



Рис. 10. Перемещение тары валом с винтовой линией с переменным шагом

Главными достоинствами новой модели являются снижение риска заклинивания при транспортировке тары, а также снижение трения и повышение срока эксплуатации.

В качестве примера использования изделий с геометрией, задаваемой похожими поверхностями, можно привести конвейерный вал для поштучной выдачи стеклянной тары на производстве. На рисунке 10 представлен подобный вал.

Предложенные конструктивные решения разработаны с учетом требований технологичности производства и сборки (монтажа), обеспечивают соблюдение условий прочности, жесткости и работоспособности конструкции изделия в соответствии с его назначением.

В ходе работы были достигнуты следующие научно-практические результаты.

1. Проведен аналитический обзор методик построения сложных 3D-поверхностей. Модели поверхностей сложной формы могут быть получены с помощью разновидностей кинематического метода, к которым относят вытягивание заданного плоского контура по нормали к его плоскости, протягивание контура вдоль произвольной пространственной кривой, вращение контура вокруг заданной оси, натягивание поверхности между несколькими заданными сечениями.

2. Выполнен анализ конструктивных элементов изделия по образцу. Выявлены и уточнены отдельные элементарные виды поверхностей и их взаимные связи (переходные поверхности). Рассмотрены кинематические особенности эксплуатационных условий шнека и выявлены прогнозируемые механические воздействия в условиях его работы в составе транспортного устройства.

3. Разработана методика построения цифровой 3D-модели изделия.

4. Выполнена разработка 3D-модели шнека с учетом предъявляемых технологических и эксплуатационных требований к его конструкции. Проведена оценка удовлетворения параметров модели критериям соблюдения кинематических особенностей эксплуатационных условий и устойчивости к прогнозируемым механическим воздействиям в процессе его работы. Предусмотрены предложения по уточнению 3D-модели изделия с учетом результатов пробной эксплуатации.

Литература

1. Андреев, Л. Н. Системы автоматизированного проектирования / Л. Н. Андреев, Д. Е. Бортяков, С. В. Мещеряков. – Санкт-Петербург : СПбГТУ, 2002. – 78 с.

2. Черепашков, А. А. Компьютерные технологии. Создание, внедрение и интеграция промышленных автоматизированных систем в машиностроении : учебное пособие / А. А. Черепашков. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2008. – 143 с.

3. Булавин, В. Ф. Валидация CAD-продуктов в малых предприятиях машиностроительного сектора / В. Ф. Булавин, Т. Г. Булавина, В. В. Яхричев // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2017. – № 5 (325). – С. 64–72.

4. Булавин, В. Ф. Цифровые технологии в малом бизнесе машиностроительной отрасли / В. Ф. Булавин, В. В. Яхричев // *САПР и графика*. – 2018. – № 6. – С. 52–55.

5. Замрий, А. А. Практический учебный курс. CAD/CAE система APM WinMachine / А. А. Замрий. – Москва : ДМК–Пресс. – 2007. – 144 с.

A.S. Stepanov, V.V. Yakhrichev
Vologda State University

DEVELOPMENT OF METHOD FOR CONSTRUCTING DIGITAL 3D MODEL OF A PRODUCT WITH SPIRAL - SPHERICAL SURFACE OF VARIABLE PITCH

The article examines the design support for the design and production of parts of automated production lines with piece-by-piece supply of production facilities, performed on the basis of specialized applied software. An original technique has been developed for constructing a digital 3D model of a special product with a spiral-spherical surface of variable pitch, taking into account the technological and operational requirements for its design.

3D model, digital mock-up, spiral-spherical surface of variable pitch, design and technological preparation of production, engineering analysis.



*А.А. Фролов¹, А.Л. Белоусов², В.П. Белоусова¹
Вологодский государственный университет¹,
Финансовый университет при Правительстве РФ²*

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ БИЗНЕСА КАК ЗНАЧИМЫЙ ФАКТОР ВЛИЯНИЯ НА РАЗВИТИЕ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ И МЕТАЛЛУРГИИ

Решение проблемы обеспечения конкурентных преимуществ продукции машиностроения и металлургии актуализирует исследования, связанные как с проблематикой расширения поля, так и с проблематикой содержательного наполнения научно-технологического взаимодействия отраслей, обеспечивающего развитие перспективных производственных технологий в условиях цифровой трансформации бизнеса. Авторами проведен анализ сдерживающих факторов и необходимых условий для развития технологий и организации производства спеченных порошковых изделий как результата междисциплинарной деятельности, объединяющей фундаментальные и прикладные инженерные знания в области металлургии и машиностроения.

Цифровая трансформация бизнеса, научно-технологическое взаимодействие, организация производства спеченных изделий.

Одним из важнейших решений для создания условий цифровой трансформации бизнеса и продвижения потенциала цифровых технологий стало утверждение Программы развития цифровой экономики в Российской Федерации до 2035 года. Промышленные предприятия РФ активно вовлекаются в данный процесс, осваивают инструменты и подходы концепции «Индустрия 4.0», ориентированной на формирование новой конкурентной среды и коренные технологические преобразования в ведущих отраслях производства.

Цифровая трансформация бизнеса предполагает смену ведущего способа координации хозяйствующих субъектов, обеспечивает условия для расширения поля и содержательного наполнения научно-технологического взаимодействия отраслей, обеспечивающего развитие перспективных производственных технологий.

Задача ускорения цифровой трансформации, стоящая перед машиностроительным сектором, обеспечивающим прочие сектора экономики основными производственными фондами, особенно актуальна. Цифровизация технологий основного производства и цифровая трансформация бизнес-процессов являются необходимыми условиями повышения конкурентоспособности продукции машиностроения – отрасли, отличающейся технико-технологической сложностью производимой продукции и многооперационностью характера производства продукции.

Отводя значимую роль цифровым технологиям, необходимо выявлять и исследовать направления технико-технологических изменений, обладающих потенциалом производства продукции с конкурентными преимуществами. Это позволит предприятию усилить конкурентные позиции, повысить результативность производственно-технологических систем и эффективность инвестиционных вложений [1].

Анализ инновационных разработок в области совершенствования технологий, применяемых при производстве широчайшей номенклатуры продукции современного машиностроения, позволяет утверждать об определенной консервативности и технологической инерционности предприятий в контексте физической формы применяемых материалов.

Технологии механической обработки литых железоуглеродистых сплавов, легированных сталей и сплавов цветных металлов, полученных методами плавильной металлургии, не позволяют существенно влиять на коэффициент полезного использования материала, а соответственно, и на снижение металлоемкости продукции, на расширение ее номенклатуры, отличающейся значимыми конкурентными преимуществами по параметрам потребительских свойств.

Научно-производственный опыт Европейских стран, Японии, США и нашего ближнего соседа – Республики Беларусь – свидетельствует, что технологии изготовления определенной номенклатуры заготовок, деталей и изделий из диспергированных (порошковых) материалов являются достойной внимания и перспективной альтернативой по отношению к технологиям, ориентированным на обработку компактных (литых) материалов методами обработки резанием [3]. При этом увеличение объемов производства порошковых изделий и расширение области их применения в значительной степени обеспечиваются инновационными технологиями.

На рисунке 1 приведены примеры номенклатуры спеченных деталей из порошковых материалов.

Применение технологий порошковой металлургии обеспечивает получение деталей с заданными геометрическими параметрами, механическими и эксплуатационными свойствами и с возможностью дальнейшей механической и термической обработки, гальваники и сварки.



Рис. 1. Примеры спеченных деталей из порошковых материалов

Особо следует отметить уникальную особенность технологий порошковой металлургии, связанную с возможностью изготавливать материалы с заданной пористостью, в частности при производстве самосмазывающихся подшипников скольжения (рис. 2.)



Рис. 2. Подшипник скольжения с втулкой из спеченного пористого материала

Смазочное масло выходит из пор при повышении температуры в подшипнике в ситуации высокой скорости скольжения, защищая от быстрого изнашивания или задира трущихся поверхностей. При охлаждении подшипника (при снятии нагрузки, уменьшении скорости скольжения) лишнее смазочное масло обратно всасывается в капилляры вкладыша или втулки подшипника из спеченного пористого порошкового материала.

Производство спеченных порошковых деталей (или порошковая металлургия в машиностроении) является результатом технологического взаимодействия металлургии и машиностроения. Американский исследователь И. МакГрат отмечал, что «основным направлением междисциплинарной работы является объединение соответствующих знаний для решения серьезной проблемы» [4, с. 7]. Проецируя данное определение на производство спеченных деталей, можно утверждать, что эта область науки и техники, охватывающая производство металлических порошков и

изделий из них, является наглядным примером результата междисциплинарной деятельности, объединяющей научно-технические фундаментальные и прикладные инженерные знания в области металлургии и машиностроения [6].



Рис. 3. Результаты научно-производственного взаимодействия отраслей

Немногочисленные российские специализированные предприятия порошковой металлургии сегодня постепенно формируют свою индивидуальную рыночную нишу реализации продукции. Следует отметить, что широта номенклатуры и объемы производства спеченных изделий и инструментов на специализированных предприятиях порошковой металлургии в РФ сегодня не обеспечивают в полной мере потребности автомобильной, станкостроительной и инструментальной промышленности, сельскохозяйственно-го машиностроения.

При этом необходимо отметить, что в настоящее время наметилась положительная тенденция производства металлических порошков в условиях специализированных предприятий плавильной металлургии или их подразделений [2]. Но для решения задачи

производства востребованной высокотехнологичной продукции из порошковых материалов представляется оправданным активизировать и развитие технологий изготовления спеченных изделий в условиях неспециализированных предприятий машиностроения.

Очевидно, что реализация обозначенных направлений производства высокотехнологичной продукции требует расширения научно-технологического взаимодействия металлургии и машиностроения, опирающегося на высокий интеллектуальный и производственный потенциал отраслей (рис. 3). Важно отметить, что осуществляемая сегодня цифровая трансформация бизнеса особо значима в контексте создания условий для активизации процессов взаимодействия отраслей.

Вологодская область относится к немногочисленным регионам, на территории которых производится продукция порошковой металлургии. На базе машиностроительного центра «ССМ-Тяжмаш» ПАО «Северсталь» реализуется производство железного порошка в промышленных масштабах методом распыления потоком сжатого воздуха (RZ-процесс). Для производства порошков используется чугун доменного производства ПАО «Северсталь». Перспективы расширения областей применения порошковых изделий связаны с использованием сложнотермически устойчивых порошков. Легированные порошки используются в производстве высокоточных деталей, получаемых путем прессования и спекания, для машиностроения, автопрома и нефтегазовой промышленности. На предприятии освоен метод диффузионно-восстановительного отжига механической смеси порошков на основе железного порошка с дисперсными добавками, содержащими легирующие элементы.

В стратегии развития компании ПАО «Северсталь» заложено расширение порошкового направления, в том числе для 3D-печати. Предполагается производство десятков разных по составу металлических порошков.

Как известно, интеллектуальный потенциал представляет собой взаимосвязанную систему информационно-интеллектуальных, творческих и профессионально-квалификационных ресурсов. Именно поэтому предприятие активно решает вопросы опережающей подготовки инженерных кадров, способных заниматься разработкой новых составов порошковых материалов, в частности, организуя на высоком уровне обучение по программе профессиональной переподготовки в области технологий синтеза металлических одно- и многокомпонентных порошков для порошковой металлургии и аддитивных технологий. Программа переподготовки по данному направлению разработана по заказу Фонда инфраструктурных и образовательных программ (ФИОП) группы РОСНАНО. Разработкой занимался Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова (ИМЕТ РАН) Российской академии наук (подведомственная организация Министерства науки и высшего образования Россий-

ской Федерации). Инициатор программы – ПАО «Северсталь» [5].

Для организации производства спеченных изделий в условиях неспециализированных машиностроительных предприятий также требуются инженерные кадры с соответствующими компетенциями. Необходимо отметить, что федеральные государственные образовательные стандарты предусматривают возможность включения в учебные планы подготовки бакалавров и специалистов для инженерной деятельности в машиностроительной отрасли вариативных дисциплин, формирующих компетенции в области актуальных для региона направлений технологического развития. Тем самым обеспечивается возможность и для решения вопросов подготовки инженерных кадров, компетентных в области технологий производства спеченных изделий, владеющих навыками разработки данных технологий.

Литература

1. Белоусов, А. Л. Вопросы развития промышленного комплекса в аспекте реализации специальных инвестиционных контрактов / А. Л. Белоусов // Управление пространственным развитием территорий: глобальные тренды и региональные приоритеты. Материалы научно-практической конференции. – 2019. – С. 138–140.
2. Белоусова, В. П. Предпринимательская концентрация в инновационно-ориентированной производственной сфере: факторы влияния / В. П. Белоусова, А. А. Фролов, А. Л. Белоусов // Вестник Южно-Российского государственного университета. – № 1. – 2020. – С. 24–31.
3. Белоусова, В. П. О роли вариативных дисциплин в формировании компетенций бакалавров в области инженерного бизнеса / В. П. Белоусова // Глобализация экономики и российские производственные предприятия : материалы 13-ой Международной научно-практической конференции (Новочеркасск, 18–20 мая 2015 г.) : в 2 частях / Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М. И. Платова. – 2015. – Ч. 1. – С. 47–49.
4. McGrath, Earl J. Interdisciplinary studies: An integration of knowledge and experience / McGrath, Earl J. // Change: The Magazine of Higher Learning. – 1978. – Vol. 10. – P. 6–9.
5. ФИОП поддержал подготовку специалистов по синтезу металлических порошков для аддитивных технологий. – URL: https://www.cnews.ru/news/line/2020-11-24_fiop_podderzhal_podgotovku (дата обращения: 28.11.2020). – Текст : электронный.
6. Фролов, А. А. Междисциплинарный подход в инженерном образовании как фактор развития технологического взаимодействия металлургии и машиностроения / А. А. Фролов, В. П. Белоусова // Научно-технический прогресс в черной металлургии – 2019: материалы IV Международной научной конференции. – Череповец : ЧГУ, 2019. – С. 211–216.

*A.A. Frolov¹, A.L. Belousov², V.P. Belousova¹
Vologda State University¹,
Financial University under the government of the Russian Federation²*

**DIGITAL BUSINESS TRANSFORMATION
AS A SIGNIFICANT FACTOR OF INFLUENCE ON THE DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC
AND TECHNOLOGICAL INTERACTION OF ENGINEERING AND METALLURGY**

Solving the problem of ensuring the competitive advantages of mechanical engineering and metallurgy products actualizes research related to both the expansion of the field and the content of the scientific and technological interaction of industries, which ensures the development of promising production technologies in the context of digital business transformation. The authors analyzed the constraining factors and necessary conditions for the development of technologies for the production of sintered powder products as a result of interdisciplinary activities that combine fundamental and applied engineering knowledge in the field of metallurgy and mechanical engineering.

Digital transformation of business, scientific and technological interaction, technologies for the production of powder materials and sintered products.



РАЗРАБОТКА ИНСТРУМЕНТОВ ПРЕДИКТИВНОЙ АНАЛИТИКИ В МЕТАЛЛУРГИИ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭВОЛЮЦИИ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

В статье на основе разработанного метода прогнозирования эволюции процессов и систем предложен практический инструмент предиктивной аналитики применительно к техническим наукам, в частности металлургической отрасли при управлении температурным режимом широкополосного стана горячей прокатки. Показан конкретный пример предсказания распределения температуры по длине прокатанной на стане полосы и возможный результат управляющего воздействия.

Предиктивная аналитика, прогнозирование параметров, температура, горячекатаный листовой прокат.

В инженерных отраслях промышленности сегодня востребованы новые технологии, которые позволяют выстраивать сквозные рабочие процессы и контролировать работу машин и агрегатов, а также всего предприятия. Например, известны системы QR-кодирования готовой продукции, создание электронных сертификатов качества, предиктивный анализ инфраструктуры и другие. Востребованы инструменты предиктивной аналитики и в системах предупреждения поломок узлов машин и ремонта.

Модель прогнозирования эволюции процессов и систем описана авторами данной статьи в [1, 2]. Она основана на том, что при изменении какого-либо технологического параметра состояния во времени, процесс можно рассматривать как эволюционный, поэтому можно воспользоваться второй производной по времени этого параметра для визуализации «энергетического» смысла процесса, когда она становится «аналогом энергии», и по ее изменению и поведению можно видеть направление развития системы – прогресс, деградацию, рост, устойчивость и т.д. Например, известно, что если дважды проинтегрировать по времени график пройденного пути, то получим график изменения ускорения. Сопоставление их друг с другом хорошо отражает взаимосвязь: если

кривая пути растет круто вверх, то на графике ускорения отражается скачок второй производной, а это значит, что в систему поступила энергия. Прогнозируя поведение энергии, можно, забегая вперед, наблюдать будущее параметра, то есть предсказывать значение параметра, в чем и состоит смысл предиктивной аналитики.

На рисунке 1 показана принципиальная схема математической обработки сигнала или параметра для получения его будущего значения.

Данная модель прогнозирования обладает свойством давать упреждающие сигналы для управления процессом в нужном технологическом режиме, что и является необходимым свойством инструментов предиктивной аналитики.

Опишем работу предлагаемой модели предиктивной аналитики на примере широкополосного стана горячей прокатки, технологическая схема которого показана на рисунке 2. На стане контролируется, например, температура металла на выходе из печи ~ 1150 °С, температура начала горячей деформации в черновых клетях ~ 1000 °С, температура конца горячей деформации в чистовых клетях ~ 900 °С и температура смотки в рулон ~ 450 °С.



Рис. 1. Принципиальная схема работы инструмента предиктивной аналитики

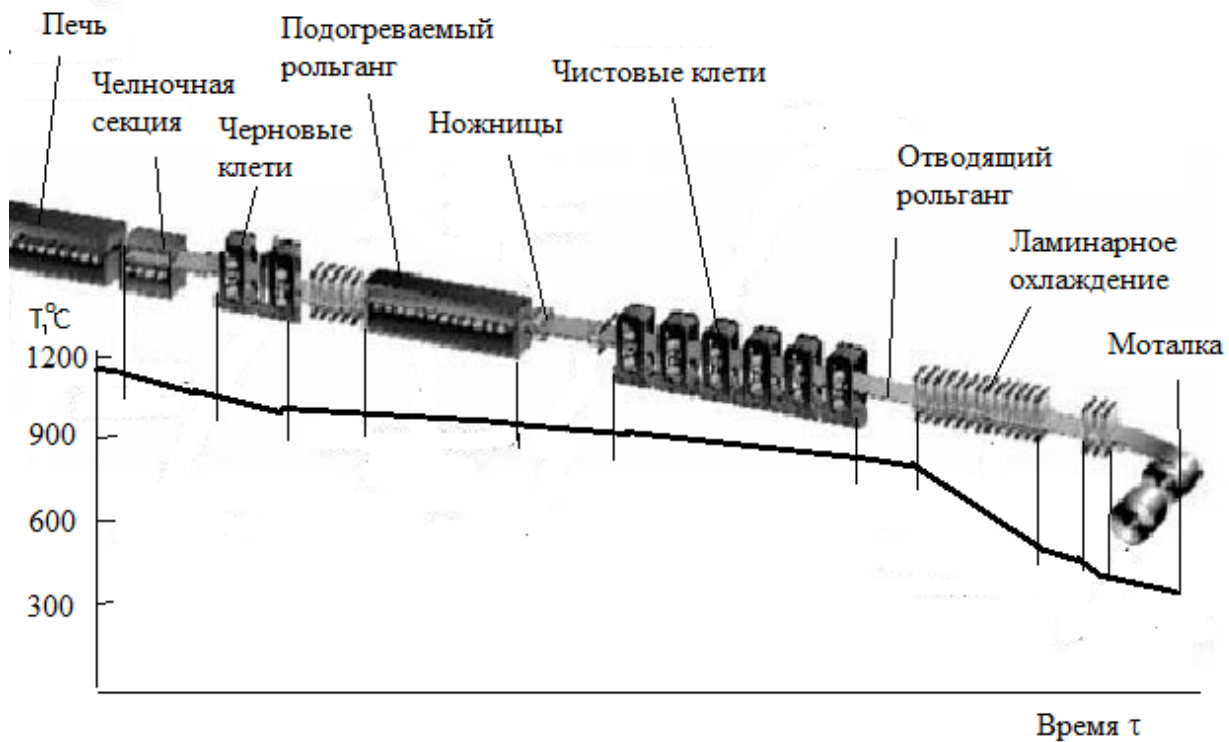


Рис. 2. Технологическая схема широкополосного стана горячей прокатки и примерный температурный режим обработки металла

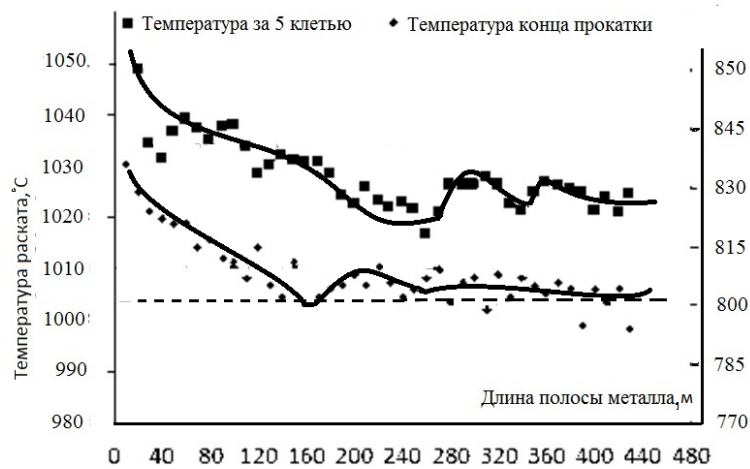


Рис. 3. Распределение по длине полосы температуры металла после черновой клетки и в конце прокатки. Точками показаны фактически замеренные температуры, линиями — результаты предиктивной аналитики

Определяющими здесь являются не только температуры, но и скорости охлаждения на отдельных участках стана, которые формируют микроструктуру стали и механические характеристики готовой продукции [3]. Одними из наиболее технологически значимых являются температура конца прокатки (конца горячей деформации) после последней клетки и температура смотки — именно они определяют свойства готовой продукции, так как задают скорость охлаждения на отводящем рольганге.

Математическая модель предиктивной аналитики включает в себя последовательность фактических (измеренных) температур металла на выходе из печи, перед первой клетью, перед второй клетью, затем мо-

дель с учетом технологических параметров (степени обжатий, интенсивности охлаждения в межклетевых промежутках и на отводящем рольганге) прогнозирует температуру конца прокатки и смотки.

Покажем это на конкретном примере. На рисунке 3 представлен температурный режим горячей прокатки на выходе металла из черновой (за 5-й клетью) и чистой (за 12-ой клетью) группы, показывающей температуру конца прокатки. По горизонтальной оси показана длина прокатываемой полосы. Данные взяты из работы [4].

Исходными данными для расчетов является ряд численных значений, получаемых путем замеров температуры за 5-й черновой клетью. Математическая

обработка заключается в формировании числового ряда первой и второй производной и ее прогнозе на шаг вперед, процесс получения которых подробно описан в [2]. Путем такой последовательности аналитических расчетов можно на стадии прохождения уже первых десятков метров полосы по окончании прокатки после чистовой клетки иметь предсказанные значения температур для всей остальной длины полосы. В случае несоответствия фактических температур режимным значениям, необходимо предпринять ускорение или замедление прокатки, изменение условий охлаждения металла душирующими устройствами или термостатирование металла тепловыми экранами.

На рисунке 3 точками показаны фактические значения температур, а кривыми линиями – результаты математического прогноза методом предиктивной аналитики, другими словами, кривые – это знания, опережающие факт.

На рисунке хорошо видно, что после 5-й черновой клетки различие температур по длине полосы может достигать тридцати градусов, особенно в сравнении переднего и заднего конца полосы. После чистовой прокатки эта неравномерность сохраняется практически с тем же разбросом значений. Однако на промежуточном между черновыми и чистовыми клетями рольганге эту неравномерность можно уменьшить путем регулируемого охлаждения или подогрева на участках, координаты которых уже известны. Например, на участке 240 ± 20 м, там, где провал температуры, требуется термостатирование, а на участке 290 ± 10 м – охлаждение душирующими устройствами.

В результате на выходе из чистовой клетки неравномерность температур может быть устранена, что в идеальном случае может принять вид прямой линии температур вдоль полосы, как показано на рисунке 3 пунктирной линией.

Таким образом, предиктивная модель должна не просто пассивно следить и прогнозировать какой-либо технологический параметр, но давать управ-

ляющие команды на регулирование интенсивности средств охлаждения, например длину участка охлаждения на отводящем рольганге для обеспечения необходимой скорости охлаждения, что обеспечивает повышение качества готовой продукции. Предиктивная аналитика в данном примере представляет собой средство управления.

Описанный инструмент предиктивной аналитики является универсальным средством, поэтому может быть использован для многих технологических процессов.

Литература

1. Щекин, С. М. Прогнозирование эволюции системы по флуктуациям параметров / С. М. Щекин // Вузовская наука – региону : материалы второй всероссийской научно-технической конференции. – Вологда : ВоГТУ, 2004. – С. 106–109.
2. Щекин, С. М. Прогнозирование развития систем для выработки управленческих решений / С. М. Щекин, М. М. Никифорова // Вестник ВоГУ. Серия технические науки. – 2019. – № 2 (4). – С. 56–60.
3. Генкин, А. Л. Оптимизация температурно-скоростного режима горячей прокатки полос: модели. методы, системы : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Генкин Аркадий Львович ; Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН. – Москва, 2009. – 46 с.
4. Татару, А. С. Исследование и разработка технологии производства горячекатанного высокопрочного автолитового проката из двухфазных ферритомартенситных сталей с заданными показателями механических свойств : специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Татару Александр Сергеевич. – Москва : НИТУ МИСиС, 2018. – 278 с.

S.M. Shchekin, M.M. Nikiforova
Vologda State University

DEVELOPMENT OF PREDICTIVE ANALYTICS TOOLS IN METALLURGY BASED ON A MODEL FOR PREDICTING THE EVOLUTION OF PROCESSES AND SYSTEMS

Basing on the developed method for predicting the evolution of processes and systems, the article offers a practical tool for predictive analytics in relation to technical sciences, in particular, for the metallurgical industry in managing the temperature regime of a hot rolling mill. A specific example of predicting the temperature distribution along the length of a strip rolled on a mill is shown.

Predictive analytics, parameters forecasting, temperature, hot-rolled flat stock.



А.П. Корнеев
Белорусско-Российский университет

ПРИМЕНЕНИЕ MATLAB ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Представлены передаточные функции для системы с распределенными параметрами. Выявлены сложности для моделирования систем с распределенными параметрами в общем виде. Указан способ аппроксимации систем с распределенными параметрами для решения этой проблемы. Представлены модели в среде MATLAB, позволяющие выполнить математическое моделирование электромеханической системы с распределенными параметрами.

Математическое моделирование, система с распределенными параметрами, аппроксимация, MATLAB.

Многочисленные объекты различных областей техники представляют собой системы с распределенными параметрами. К ним относятся длинные линии электропередач, трубопроводы для перекачки воды и нефти, объекты, включающие длинные стержни, например: в бурении – колонна труб, в глубинно-насосных установках – штанга, в грузоподъемных механизмах – трос и канат, и т.д. [1].

Упругие деформации звеньев механических передач являются одним из факторов, препятствующих повышению эффективности управления электромеханическими объектами управления [2].

Увеличение быстродействия современных машин при одновременном возрастании пространственных размеров, повышение требований к точности перемещений, появление принципиально новых конструкций определяет условия, при которых невозможно создание высококачественных систем управления машин и механизмов без учета свойств механической части электропривода. Многие установки являются нестационарными электромеханическими системами с распределенными параметрами [3].

Передаточная функция движущего усилия к скорости перемещения, для любого сечения известна:

$$W(x,p) = \frac{ch(\tilde{p} \cdot \tilde{x}) \cdot sh(\tilde{p})}{2 \cdot a \cdot (sh^2(\tilde{p}) + \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \tilde{p}^2 \cdot [ch^2(\tilde{p}) - ch^2(\tilde{p} \cdot \tilde{x})] + (\mu_1 + \mu_2) \cdot \tilde{p} \cdot sh(\tilde{p}) \cdot ch(\tilde{p}))}, \quad (1)$$

где x – текущее расстояние между центром массы 1 и грузом, m ; L – расстояние между центрами масс, m ; $\tilde{x} = 1 - \frac{x}{L}$ – относительная координата выходной точки; $\mu_i = M_i/M_k$ – i -ая относительная масса; a – скорость волны распространения колебаний, m/c , $\tilde{p} = p \frac{L}{a}$ – нормированный оператор Лапласа.

Передаточная функция движущего усилия к скорости вала двигателя:

$$W_i(x,p) = \frac{ch(\tilde{p} \cdot \tilde{x}) \cdot sh(\tilde{p}) + \mu_2 \cdot \tilde{p} \cdot (ch^2(\tilde{p}) - ch^2(\tilde{p} \cdot \tilde{x}))}{2 \cdot a \cdot (sh^2(\tilde{p}) + \mu_1 \cdot \mu_2 \cdot \tilde{p}^2 \cdot [ch^2(\tilde{p}) - ch^2(\tilde{p} \cdot \tilde{x})] + (\mu_1 + \mu_2) \cdot \tilde{p} \cdot sh(\tilde{p}) \cdot ch(\tilde{p}))}. \quad (2)$$

Основными характеристиками линейных распределенных колебательных систем являются собственные частоты (собственные значения) и собственные формы (собственные функции). Знание собственных частот необходимо для исследования устойчивости состояния равновесия системы.

Моделирование систем с распределенными параметрами (СРП) в общем виде во временной области затруднительно, так как передаточная функция СРП содержит гиперболические функции, а существующие математические программы используют численный расчет. Но при работе установок постоянно меняются собственные резонансные частоты. Вследствие этого, необходимо не только постоянно рассчитывать резонансные частоты, но и выполнять другие вспомогательные вычисления в зависимости от метода аппроксимации, например вычеты. Расчет на каждом шаге моделирования приведет к резкому увеличению мощности ПК при увеличении времени моделирования [4].

Для решения этой проблемы разработан способ аппроксимации СРП при разложении на произведения $(p^2 + \omega^2)$, подробно описанный в [5]. При такой аппроксимации не требуются дополнительные вспомогательные вычисления, что значительно упрощает и ускоряет процесс моделирования СРП. Для еще большего упрощения и ускорения процесса моделирования СРП использован способ замены непосредственных вычислений резонансных частот интерполяцией значений, рассчитанных в некоторых промежуточных точках. Метод интерполяции сплайном. Данный метод является достаточно простым и точным для инженерных расчетов.

Для выполнения этих вычислений разработаны модели вычислителя резонансных частот. Теоретическое обоснование в [6]. Модель вычислителя представлена на рисунке 1.

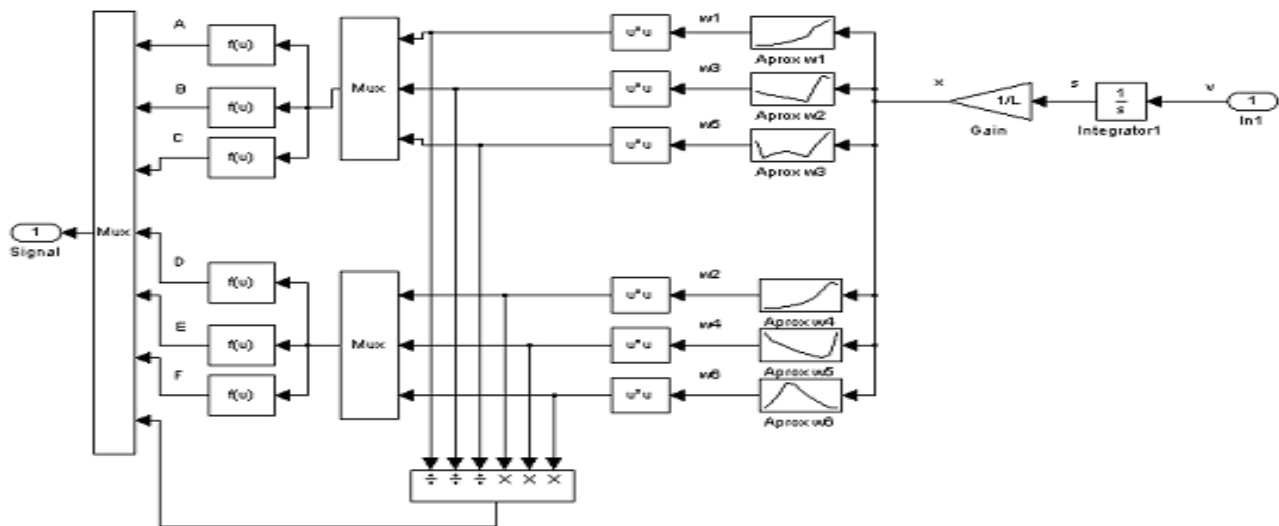


Рис. 1. Модель вычислителя резонансных частот

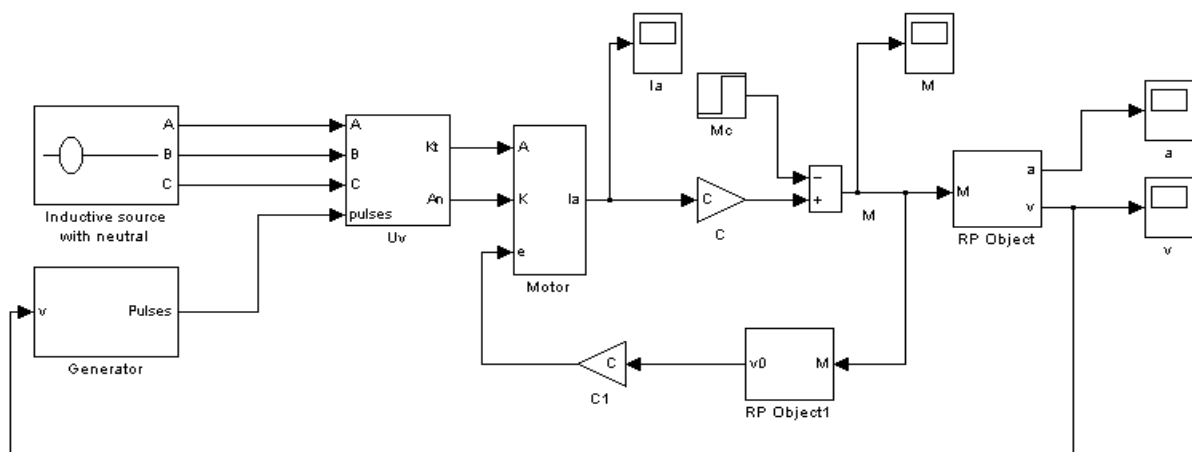


Рис. 2. Модель системы с распределенными параметрами

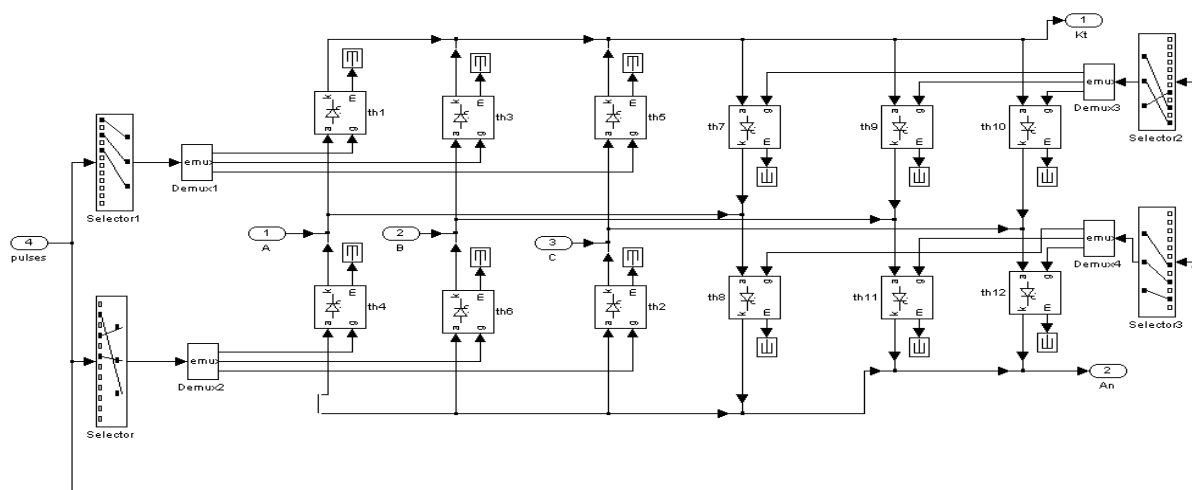


Рис. 3. Модель тиристорного преобразователя

Для учета изменения парциальных параметров необходимо изменить коэффициенты в блоках Aprox w1 – Aprox w6. Разработанная математическая модель электромеханической системы с распределенными параметрами представлена на рисунке 2. Математическая модель построена в MATLAB/Simulink с применением элементов библиотеки Power System Blockset.

Полученная модель может применяться для расчета и исследования как частотных, так и энергетических характеристик.

На рисунке 3 представлена модель тиристорного преобразователя, реализованная при помощи моделей тиристоров для получения данных о мгновенных значениях напряжения и тока для каждого тиристора и всего преобразователя.

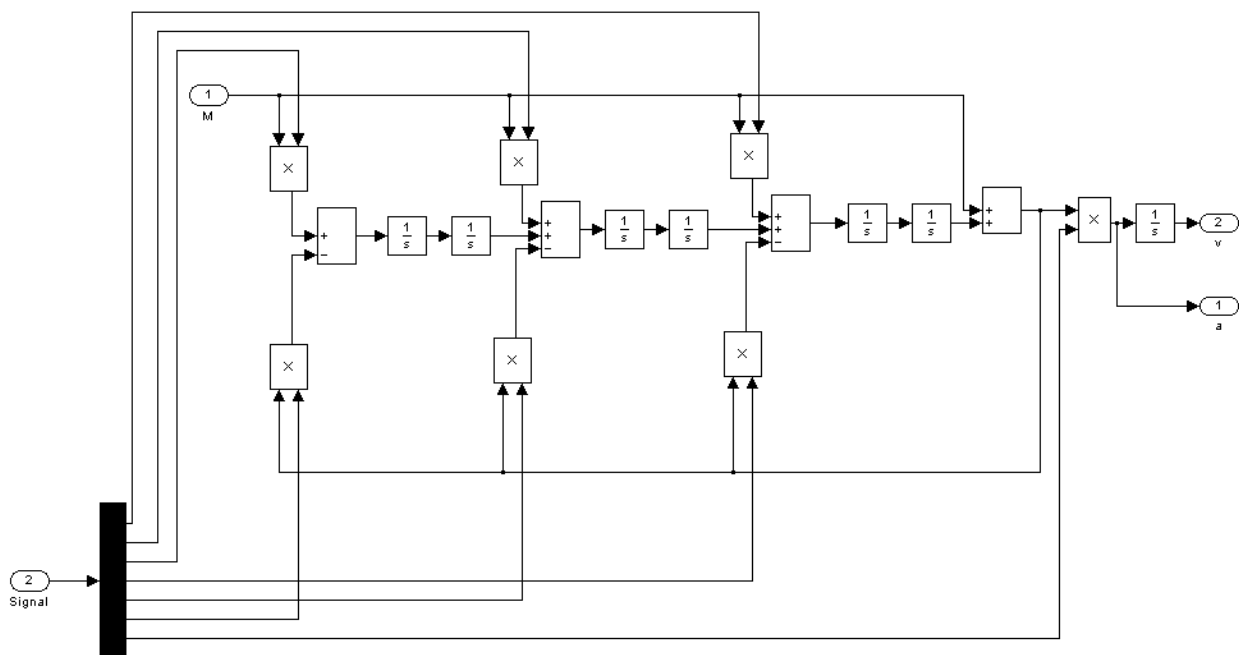


Рис. 4. Модель вычисления скорости от усилия на валу двигателя

Расчет скорости объекта на валу двигателя описывается уравнениями (1) и (2). Для этого создана модель, представленная на рисунке 4.

В пакетах MATLAB/Simulink и Power System Blockset разработаны модели для математического моделирования ЭМС СПП.

Литература

1. Рассудов, Л. Н. Электроприводы с распределенными параметрами электромеханических элементов / Л. Н. Рассудов, В. Н. Мядзель – Ленинград : Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1987. – 144 с.
2. Бутковский, А. Г. Методы управления системами с распределенными параметрами / А. Г. Бутковский. – Москва : Наука, 1975. – 230 с.
3. Кузовков, Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Н. Т. Кузовков. – Москва : Машиностроение, 1976. – 184 с.

4. Корнеев, А. П. Применение пакета MATLAB для исследования частотных характеристик в объектах с распределенными параметрами / А. П. Корнеев, Г. С. Ленецкий // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2005. – № 3. – С. 55–59.

5. Корнеев, А. П. Новый способ аппроксимации механической части нестационарной электромеханической системы с распределенными параметрами / А. П. Корнеев // Наука настоящего и будущего : сборник материалов конференции V научно-практической конференции с международным участием (Санкт-Петербург, 17–18 марта 2017 г.) // СПбГЭТУ ЛЭТИ. – Санкт-Петербург, 2017. – С. 168–170.

6. Толочко, О. І. Анализ та синтез електромеханічних систем зі спостерігачами стану / Толочко О. І. – Донецк : Норд-Пресс, 2004. – 298 с.

A.P. Korneev

Belarus-Russian University

MATLAB APPLICATION FOR MATHEMATICAL MODELING OF AN ELECTROMECHANICAL SYSTEM WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

Transfer functions for a distributed parameter system are presented. Difficulties for modeling systems with distributed parameters in general are indicated. A method for approximating systems with distributed parameters for solving this problem is indicated. Models in MATLAB environment, which allow performing mathematical modeling of an electromechanical system with distributed parameters, are presented.

Mathematical modeling, distributed parameter system, approximation, MATLAB.



КИБЕРНЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЙ ДЫХАТЕЛЬНОГО ГОМЕОСТАЗА

В данной работе проведен кибернетический анализ состояния дыхательного гомеостаза методом модального управления и оценена матрица линейных обратных связей, обеспечивающая стабилизации системы с заданной динамикой.

Кибернетический анализ, дыхательный гомеостаз, модальный синтез, регулятор.

В настоящее время в связи с возрастающей потребностью в высококачественных сложных системах ведутся исследования с целью разработки методов, пригодных для проектирования таких систем. Подобные методы должны быть действенными не только с точки зрения вычислений, но также, что более важно, должны способствовать выработке общего подхода к таким задачам. Наиболее опытные инженеры обладают определенной интуицией, а потому любой предлагаемый метод должен дать возможность инженеру «схватить» его техническую сторону, произвести оценку на основе практического опыта.

Анализ и синтез систем со многими входами и выходами, называемых многосвязными, представляет собой сложную задачу. Определение взаимно связанных воздействий и управление ими в многосвязных системах встречает определенные трудности, наилучшим образом разрешаемые привлечением кибернетических навыков.

Кибернетика эта наука об управлении сложными системами, которая изучает общие закономерности процессов, происходящих в живой природе, человеческом обществе, технике или промышленности, и обеспечивает создание систем оптимального управления этими процессами в оптимальном варианте. Это интегральная наука, возникшая на стыке ряда специальных дисциплин – теории автоматов, техники связи, математической логики, теории информации и других.

Пользуясь терминологией кибернетики, действительно можно сказать, что живой организм представляет собой сложную управляемую систему, в которой постоянно происходит взаимодействие множества переменных внешней и внутренней среды. В связи с этим представляет интерес исследование поведения системы в живом организме, в частности системы дыхательного гомеостаза [1].

Человеческий организм позволяет поддерживать дыхательный гомеостаз путем периодического обновления воздуха в легких. Дыхательный гомеостаз – состояние, характеризующееся оптимальным для жизнедеятельности относительным постоянством газового состава крови и тканей. Постоянно меняющиеся режимы деятельности организма, связанные с изменениями потребления O_2 и выделением CO_2 (мышечная деятельность, эмоциональные реакции, состав

атмосферного воздуха) могут влиять на дыхательный гомеостаз.

Дыхательный гомеостаз представляет собой систему регуляций, предназначенную для поддержания постоянства напряжения углекислого газа (PCO_2), концентрации водородных ионов (H^+) и напряжения кислорода (PO_2) в артериальной крови при наличии некоторых возмущений.

Цель данной работы – иметь представление о гомеостазе, ознакомление с алгоритмом синтеза регулятора системы стабилизации дыхательного гомеостаза и проведение кибернетического анализа состояния гомеостаза методом модального управления.

Метод модального управления основан на использовании корней характеристического уравнения, которые относятся к модальным характеристикам системы.

Любая кибернетическая система в упрощенном виде состоит из следующих звеньев: входа (детектора), блока управления, блока исполнения (эффектора) и выхода (рис. 1).

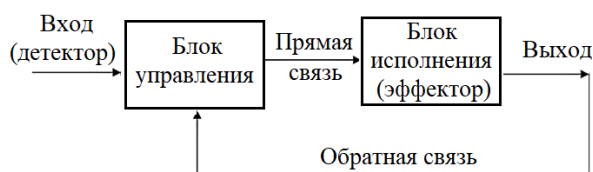


Рис. 1. Кибернетический механизм регуляции гомеостаза

В соответствии с заданным алгоритмом через вход системы в блок управления поступает информация в виде переменных величин, затем после переработки по каналам прямой связи в блок исполнения, и оттуда на выход. Как видно из рисунка 1, между блоками управления и исполнения, а также блоками управления и выхода имеется прямая и обратная связи. Результирующая информация о выполнении команд передается к управляющей части по каналу обратной связи и учитывается при выработке последующих команд. Обратная связь является одним из способов приспособления организмов к меняющимся условиям существования.

Вместе с тем обратная связь существует в двух видах – отрицательной и положительной. В биологи-

ческих системах в основном работает отрицательная обратная связь (ООС). Сущность ООС заключается в том, что при нарушении равновесия в какой-нибудь системе живого организма может возникать ряд последствий, которые приводят к устранению этих нарушений.

Примером ООС может служить регулирование уровня содержания углекислого газа, кислорода и водородных ионов в дыхательной системе живого организма.

В качестве примера рассмотрим систему дыхательного гомеостаза по Ф. Гродинзу (рис. 2) [2].

Термин «гомеостаз» применяется для обозначения постоянства химического состава внутренней среды организма. Дыхательная система служит главным образом для сохранения постоянства напряжения кислорода и углекислого газа, а также концентрации водородных ионов (рН). На данной схеме в качестве входного сигнала принята альвеолярная концентрация V_A . Буквой i обозначены входные параметры, а буквой o – выходные. Здесь «возмущениями», поступающими на вход, являются повышенное содержание углекислого газа, недостаток кислорода во вдыхаемом воздухе или сдвиги рН крови.

Для стабилизации концентрации CO_2 в данной системе возможно использование линейных обратных связей [3]. Управляющий сигнал (вектор $u(t)$) при этом формируется по закону:

$$u = -K\hat{x}(t), \quad (1)$$

где $\hat{x}(t)$ – оценка вектора состояния объекта; K – матрица обратных связей с постоянными коэффициентами.

В соответствии с положениями теории автоматического управления [6] объект, заданный матрицами A, B, C , описывается векторно-матричной моделью в пространстве состояний [4]:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu, \\ y = Cx, \end{cases} \quad (2)$$

где \dot{x} – функция, описывающая изменение входных параметров; y – функция, описывающая изменение выходных параметров системы.

Для синтеза регуляторов и наблюдателей системы управления данным объектом необходимо оценить управляемость и наблюдаемость этого объекта.

Управляемость гарантируется, если матрица

$$D_y = [B, AB, A^2B, A^3B] \quad (3)$$

имеет ранг, равный четырем.

Аналогично наблюдаемость гарантируется, если матрица

$$D_i = [C^T, A^T C^T, (A^T)^2 C^T, (A^T)^3 C^T] \quad (4)$$

также имеет ранг, равный четырем.

Матрицы A, B, C , могут быть преобразованы в различные формы, называемые каноническими [5].

Каноническая управляемая форма имеет вид

$$A_y = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 & -a_3 & -a_4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, B_y, C_y,$$

каноническая наблюдаемая форма имеет вид

$$A_i = \begin{bmatrix} -a_1 & 1 & 0 & 0 \\ -a_2 & 0 & 1 & 0 \\ -a_3 & 0 & 0 & 1 \\ -a_4 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_i, C_i,$$

где a_1, a_2, a_3, a_4 , – коэффициенты характеристического многочлена исходной матрицы A .

Подставляя (1) в уравнение (2), получим:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) - BK\hat{x}(t). \quad (5)$$

Если оценка вектора состояния $\hat{x}(t)$ сходится с заданной разработчиком скоростью к вектору состояния $x(t)$ или вектор $\hat{x}(t)$ измеряется непосредственно, то динамика управления объектом будет определяться уравнением:

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) \quad (6)$$

и, следовательно, выбором собственных значений матрицы $A - BK$. Синтез управления в этом случае называется синтезом модального управления, так как выбранные разработчиком собственные значения матрицы $A - BK$ (моды) будут определять движение всей системы [6]. Таким образом, модальное управление может обеспечить устойчивость и быстрое действие многомерной системы. Точность в данном случае проверяется при моделировании синтезированной системы.

Зададим собственные значения $\beta_i, i = \overline{1,4}$ и $\text{Re } \beta_i < 0$. Тогда характеристический многочлен матрицы $A - BK$ будет иметь вид:

$$J_{A-BK}(\lambda) = (\lambda - \beta_1)(\lambda - \beta_2) \dots (\lambda - \beta_n).$$

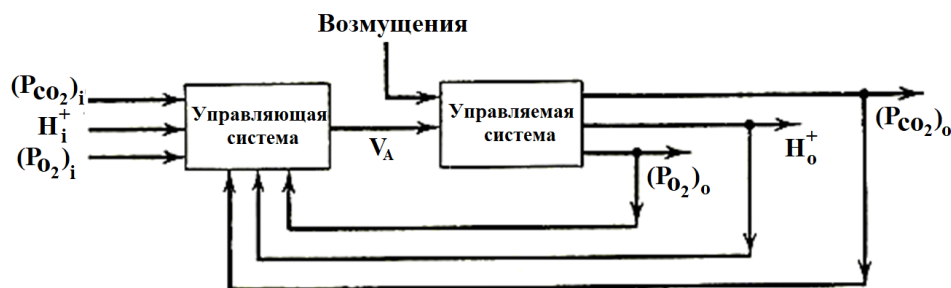


Рис. 2. Блок-схема дыхательного гомеостаза по Ф. Гродинзу

Сопровождающая матрица многочлена имеет вид, совпадающий с видом матрицы состояния в канонической управляющей форме:

$$A_y - B_y K_y = \begin{bmatrix} -\gamma_1 & -\gamma_2 & -\gamma_3 & -\gamma_4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где $\gamma_i, i = \overline{1,4}$ – коэффициенты характеристического многочлена при $\gamma_0 = 1$; A_y и B_y – матрицы в канонической управляемой форме, то есть

$$A_y = \begin{bmatrix} -a_1 & -a_2 & -a_3 & -a_4 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_y = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$K_y = [k_{y1}, k_{y2}, k_{y3}, k_{y4}]. \quad (8)$$

Тогда, подставляя (8) в (7) получим

$$A_y - B_y K_y = \begin{bmatrix} -a_1 - k_{y1} & -a_2 - k_{y2} & -a_3 - k_{y3} & -a_4 - k_{y4} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Отсюда из (7) получим равенства $k_{yi} = \gamma_i - a_i, i = \overline{1,4}$. Преобразуя к исходному базису по формуле $K = K_y M$, получим матрицу линейных обратных связей, обеспечивающую работу системы стабилизации с заданной динамикой.

Для случая непосредственного измерения вектора состояния: $C = I$, где I – единичная матрица.

Импульсную реакцию такой системы можно определить по формуле:

$$x(t) = e^{(A-BK)t} \delta(t). \quad (9)$$

Матричную экспоненту в формуле (9) можно вычислить по следующему алгоритму:

1) по набору собственных чисел β_i найдутся числа γ_i по формулам:

$$\gamma_0 = 1, \quad (10a)$$

$$\gamma_1 = -(\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4), \quad (10б)$$

$$\gamma_2 = \beta_1\beta_2 + \beta_1\beta_3 + \beta_1\beta_4 + \beta_2\beta_3 + \beta_2\beta_4 + \beta_3\beta_4, \quad (10в)$$

$$\gamma_3 = -(\beta_1\beta_2\beta_3 + \beta_1\beta_2\beta_4 + \beta_1\beta_3\beta_4 + \beta_2\beta_3\beta_4), \quad (10г)$$

$$\gamma_4 = \beta_1\beta_2\beta_3\beta_4; \quad (10д)$$

2) вычисляются числа k_i :

$$k_{yi} = \gamma_i - a_i; \quad (11)$$

3) составляется матрица K_y :

$$K_y = [k_{y1}, k_{y2}, k_{y3}, k_{y4}];$$

4) вычисляется матрица $B = MB_y$;

5) вычисляется матрица K :

$$K = K_y M; \quad (12)$$

6) вычисляется матрица $A - BK$;

7) по собственным числам β_i находят собственные векторы u_i ; вектором u_i является любое ненулевое решение системы

$$(A - BK - \beta_i)u_i = 0;$$

8) составляется модальная матрица $U = [u_1, u_2, u_3, u_4]$;

9) вычисляется обратная матрица U^{-1} ;

10) вычисляется матрица $Ue^{\Lambda t}U^{-1}$, где

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta_4 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

По такому алгоритму проводится кибернетический анализ состояний гомеостаза, обусловленных процессом дыхания.

Пример. Рассмотрим матрицу

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 2 & 1 & 2 & 3 \\ 3 & 2 & 1 & 2 \\ 4 & 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

Покажем способ приведения этой матрицы к канонической управляемой форме. Для этого последовательно построим матрицы M_3, M_2 и M_1 , которые последовательно приводят матрицу A к нужной канонической форме. Матрица M_3 равна:

$$M_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -2 & -1.5 & 0.5 & -0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Она получается из единичной матрицы путем замены ее третьей строки на строку:

$$m_{31} = -\frac{a_{41}}{a_{43}}, \quad m_{32} = -\frac{a_{42}}{a_{43}}, \quad m_{33} = \frac{1}{a_{43}}, \quad m_{34} = -\frac{a_{44}}{a_{43}}.$$

Тогда имеем:

$$M_3^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 4 & 3 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A' = M_3^{-1} A M_3 = \begin{bmatrix} -5 & -2.5 & 1.5 & 2.5 \\ -2 & -2 & 1 & 2 \\ -24 & -15 & 11 & 19 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Матрица M_2 равна:

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1.6 & -0.06 & 0.7 & 1.2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Она получается из единичной матрицы путем замены ее второй строки на строку:

$$m_{21} = -\frac{a'_{31}}{a'_{32}}, \quad m_{22} = \frac{1}{a'_{32}}, \quad m_{23} = -\frac{a'_{33}}{a'_{32}}, \quad m_{24} = -\frac{a'_{34}}{a'_{32}}.$$

Тогда имеем:

$$M_2^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -24 & -15 & 11 & 19 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A'' = M_2^{-1} A' M_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0,2 & 0 & -1 \\ 6 & 5 & 34 & 24 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Матрица M_1 равна:

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0,17 & -0,83 & -5,67 & -4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Она получается из единичной матрицы путем замены ее первой строки на строку:

$$m_{11} = \frac{1}{a_{21}''}, \quad m_{12} = -\frac{a_{22}''}{a_{21}''}, \quad m_{13} = -\frac{a_{23}''}{a_{21}''}, \quad m_{14} = -\frac{a_{24}''}{a_{21}''}.$$

Тогда имеем

$$M_1^{-1} = \begin{bmatrix} 6 & 5 & 34 & 24 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad A''' = M_1^{-1} A'' M_1 = \begin{bmatrix} 4 & 40 & 56 & 20 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Полученная матрица и есть каноническая матрица управления: $A_y = A'''$.

Если обозначить: $M = M_3 M_2 M_1$, то $M^{-1} = M_1^{-1} M_2^{-1} M_3^{-1}$ и, следовательно,

$$M = \begin{bmatrix} 0,167 & -0,83 & -5,67 & -4 \\ -0,27 & 1,267 & 9,8 & 7,667 \\ 0,067 & -0,23 & -2,87 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$M^{-1} = \begin{bmatrix} 242 & 192 & 178 & 208 \\ 20 & 18 & 22 & 30 \\ 4 & 3 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Тогда, справедливо равенство

$$A_y = M^{-1} A M. \quad (14)$$

Если матрицами управления и наблюдения являются:

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix}, \quad C = [1, 0, 0, 0],$$

то соответствующие канонические матрицы определяются равенствами:

$$B_y = M^{-1} B = \begin{bmatrix} 416 \\ 60 \\ 2 \\ 2 \end{bmatrix}, \quad C_y = C M = [0, 167, -0,833, -5,667, -4].$$

Матрица P линейного преобразования к заданной форме находится по следующему правилу:

$$P_y = [B_y, A_y B_y, A_y^2 B_y, \dots, A_y^{n-1} B_y] \cdot [B, AB, A^2 B, \dots, A^{n-1} B]^{-1}, \quad (15)$$

где n – размер матрицы A .

Данное преобразование находится корректно в случае, когда матрица B является вектором и система является управляемой (в случае приведения к канонической управляемой форме) или наблюдаемой (в случае приведения к канонической наблюдаемой форме).

Таким образом, управляющая система в жизни всегда более сложна, чем на кибернетических схемах, но, тем не менее, модель оказалась весьма полезной. На основе закономерностей гомеостаза разрабатываются эффективные методы лечения и рациональной терапии.

Именно кибернетике принадлежит роль и механизмов гомеостаза живого организма, так как эта наука позволяет, применяя теорию автоматического регулирования и математического анализа, решить ряд биологических и медицинских вопросов и проблем. Очевидно, что данное направление открыло новые перспективы для дальнейших клинических и диагностических исследований и внедрения современной техники для нужд здравоохранения в Российской Федерации. Дальнейший прогресс решения актуальных задач в области биомедицины лежит в совместном решении специалистами различного профиля.

Литература

1. Минцер, О. П. Биологическая и медицинская кибернетика : справочное пособие / О. П. Минцер. – Киев : Наукова думка, 1986. – 375 с.
2. Гродинз, Ф. Теория регулирования и биологические системы : перевод с английского / Ф. Гродинз. – Москва : Мир, 1966. – 252 с.
3. Андреев, Ю. Н. Управление конечномерным линейным объектом : учебное пособие / Ю. Н. Андреев. – Москва : Наука, 1976. – 424 с.
4. Деруссо, П. Пространство состояний в теории управления: учебное пособие / П. Деруссо, Р. Рой, Ч. Клоуз. – Москва : Наука, 1986. – 620 с.
5. Грандмахер, Ф. Р. Теория матриц : учебное пособие / Ф. Р. Грандмахер. – Москва : Физматлит, 2010. – 560 с.

A.G. Kuzmin, M.F. Umarov
Vologda State University

CYBERNETIC ANALYSIS OF RESPIRATORY HOMEOSTASIS CONDITIONS

In this paper a cybernetic analysis of the state of respiratory homeostasis by modal control method is performed and a matrix of linear feedbacks, which provides stabilization of the system with a given dynamics, is evaluated.

Cybernetic analysis, respiratory homeostasis, modal synthesis, regulator.



ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ СЕТИ ПО КЛАВИАТУРНОМУ ПОЧЕРКУ

Статья посвящена развитию методов аутентификации пользователей сети на основе анализа компьютерного почерка. Предлагается модель формирования набора признаков идентификации пользователей информационных систем по компьютерному почерку, идентификации пользователей распределенных информационных систем по клавиатурному почерку. Данная модель основана на использовании математического аппарата теории нечетких множеств и теории вероятностей.

Идентификация, биометрические характеристики, аутентификация, клавиатурный почерк, модель идентификации.

Клавиатурный почерк – уникальная характеристика, присущая каждому человеку. Чтобы составить персональный профиль, современным системам необходимо проанализировать способ набора текста, оценить скорость набора текста, паузы между ударами и время удержания клавиш [1].

Многие специалисты по безопасности считают, что использование таких технологий на веб-сайтах несет в себе реальную угрозу. Ни один пользователь не сможет оставаться в сети анонимным, к тому же всегда есть шанс, что персональная информация попадет не в те руки.

Клавиатурный почерк – это не только скорость ввода информации, но и интервалы между нажатием на клавиши и число перекрытий между ними, время удержания мыши, степень ритмичности при наборе текста и использование функциональных клавиш.

Биометрическое распознавание объекта основано на сравнении физиологических или психологических особенностей этого объекта с его характеристиками, хранящимися в базе данных системы [2].

Контроль доступа в компьютерные системы, реализуемый на основе анализа клавиатурного почерка (КП), имеет ряд преимуществ. Системе не требуется никакого специального оборудования: для снятия параметров клавиатурного почерка достаточно специальной программы и клавиатуры пользователя, что значительно снижает стоимость системы. Таким образом, система контроля доступа в компьютерную систему на основе распознавания КП дешевле любого другого аппаратно-программного комплекса биометрической идентификации. В число недостатков такой системы можно включить значительную зависимость от психофизического состояния легального пользователя, чувствительность к естественным изменениям КП в течение времени – в процессе работы на клавиатуре, КП претерпевает изменения, что также сказывается на работе системы.

Вышеперечисленные недостатки существующих систем распознавания КП усложняют задачу формирования набора уникальных признаков пользователя, на которые не оказывалось бы никакого влияния. Хо-

тя указанные факторы приводят к ошибкам системы первого рода, ошибки второго рода практически невозможны.

Ошибка первого рода – пропуск события – отказ в доступе легальному пользователю. Ошибка второго рода – ложное срабатывание – допуск в систему заведомо нелегального пользователя. Применительно к системам управления контролем доступа вероятности возникновения ошибок первого и второго рода находятся в обратной зависимости [3]. В целом, принцип формирования КП основывается на снятии таких параметров клавиатурного ввода, как длительность удержания клавиш (ДУК), интервалы между нажатиями клавиш (ИН), наложения нажатий клавиш (НН). Перечисленные параметры собираются в первичную матрицу, из которой затем выделяются две: для одиночных нажатий и для нажатий клавиш с наложениями. В каждую матрицу добавляется математическое ожидание ДУК. Таким образом, формируется бимодальное распределение указанных параметров [4].

Эталоном клавиатурного почерка в таком случае будут две таблицы математических ожиданий ДУК, заполняемых на этапе «Обучения системы». В ходе дальнейшей работы система снимает показания с клавиатуры и сравнивает их с эталоном. В случае незначительных расхождений между эталоном и полученными с клавиатуры параметрами, пользователь считается легальным. Эти значения вносятся в общую выборку показателей, производится перерасчет математических ожиданий и вносятся поправки в эталон. Так нивелируется влияние естественных изменений КП на распознавание легальных пользователей. В случае критических расхождений с эталоном, пользователь признается нелегальным и система блокируется. При подмене авторизованного пользователя система распознавания КП работает практически безотказно, однако изменение психофизического состояния легального пользователя изменяет его КП. Расхождения с эталоном достигают или превосходят критические значения и система блокируется. В итоге возникает большое количество ошибок первого рода.

Однако при использовании гистограммного метода распознавания КП на основе показателей ДУК, ИН и НН составляются отдельные матрицы распределений. Учитывая взаимное расположение клавиш на клавиатуре и частоту их нажатий, для матрицы ДУК и ИН составляются трехмерные Гауссовы распределения, а для матрицы НН – двухмерное Гауссово распределение. Взаимное наложение этих распределений позволяет сформировать эталон КП, уникальный для каждого пользователя конкретной компьютерной системы. В процессе обучения системы на основе полученных значений указанных выше параметров система формирует «отпечаток» положения кистей рук относительно клавиатуры (ПКР).

В режиме идентификации пользователя система создает временный пример КП идентифицируемого пользователя по тому же принципу, что и эталон. Затем сравнивает получившийся «отпечаток» с эталонным. При точном совпадении или совпадении с минимальными различиями пользователь признается легальным и получает доступ к системе. При значительном расхождении полученного примера и эталона, пользователь признается нелегальным и получает отказ в доступе к системе.

Положение кистей рук относительно клавиатуры является устойчивым биометрическим параметром. ПКР – это уникальная характеристика КП для любого пользователя компьютерной системы. ПКР как неотъ-

емляемая характеристика КП является признаком, наименее подверженным влиянию психофизических факторов. Основное влияние на ПКР оказывает конфигурация рабочего места и клавиатуры. Однако у каждой компьютерной системы клавиатура своя, и заменяется, как правило, достаточно редко. Поэтому этот фактор практически не влияет на распознавание легального пользователя.

Литература

1. Сапиев, А. З. О методах аутентификации пользователей на основе анализа компьютерного почерка // Информатика: проблемы, методология, технологии. Материалы XVI Международной научно-методической конференции / под редакцией Тюкачева Н. А. – Воронеж, 2016. – С. 251–256.
2. Савинов, А. Н. Анализ решения проблем возникновения ошибок первого и второго рода в системах распознавания клавиатурного почерка / А. Н. Савинов, В. И. Иванов // Вестник Волжского университета имени В. Н. Татищева. Серия Информатика. – 2011. – Вып. 18. – С. 115–119.
3. Сидоркина, И. Г. Три алгоритма управления доступом к КСИИ на основе распознавания клавиатурного почерка / И. Г. Сидоркина, А. Н. Савинов // Вестник Чувашского университета. – 2011. – № 3. – С. 293–301.

A.Z. Sapiev

Maikop State Technological University

IDENTIFICATION OF NETWORK USERS BY KEYBOARD RHYTHM

The article is devoted to the development of authentication methods for network users based on the analysis of computer handwriting. A model for the formation of a set of features for identifying users of information systems by computer handwriting, identification of users of distributed information systems by means of keyboard rhythm is proposed. This model is based on the use of the mathematical tool of the theory of fuzzy sets and the theory of probability.

Identification, biometric characteristics, authentication, keyboard rhythm, identification model.

УДК 62-752.2:608.2



М.И. Вольников, М.С. Гашицкий
Пензенский государственный технологический университет

УПРАВЛЕНИЕ ВИБРОЗАЩИТОЙ ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНЫХ СРЕД

Статья посвящена проблеме повышения эксплуатационной стойкости трубопроводов. Показано, что одна из причин разрушения трубопроводов связана с длительными воздействиями вибрационных и ударных нагрузок. Приведенные статистические данные по авариям подтверждают данное предположение. Проведен обзор существующих решений защиты трубопроводов с описанием достоинств и недостатков. Предложено новое техническое решение проблемы, основанное на использовании гетероструктур с трением в качестве диссипативного материала при устранении вибраций. Проведен сравнительный анализ преимуществ предложенного решения.

Вибрация, виброзащита, трубопровод, авария, гетероструктуры, дискретные среды, устройство виброзащиты.

В повседневной жизни часто приходится сталкиваться с множеством проблем, связанных с работой коммунального хозяйства в городах. Одна из них относится к системе трубопроводов, по которым поступает холодная вода, теплоэнергия, отводятся канализационные стоки, подается пар и осуществляется вентиляция, и связана с непредсказуемыми авариями.

Авария на трубопроводе – нередкое и довольно опасное явление, наносящее ущерб экономике страны. Одной из причин возникновения подобных аварий является усталостное разрушение труб за счет длительного воздействия вибраций.

Согласно данным ПАО «Газпром», более половины (около 60 %) аварий на трубопроводах топливно-энергетического комплекса происходит в результате повышенных уровней вибраций и гидроударов. Также в тройке основных выделяют следующие причины разрывов [1]:

- 25 % – коррозионные процессы;
- 15 % – явления природы и неминуемые ситуации.

За последние 30 лет в главных корпусах ТЭС произошло 30 крупных аварий, которые привели к выходу из строя более одного энергоблока [2].

Вибрация в трубопроводе может возникать в результате случайных или функциональных воздействий. К таким можно отнести поток жидкости, ветер, сейсмические волны, акустические колебания (например, от городского шума), вибрации от проезжающих автомобилей, поездов и другого вида транспорта.

Помимо этого, источником вибрации могут быть насосные и компрессорные станции. Они оснащены мощными центробежными или поршневыми насосными установками и нагнетателями, которые, в свою очередь, создают сильные волновые и вибрационные колебания в системах транспортировки нефти и газа.

Согласно статистическим данным существенными факторами, которые способствуют возникновению

аварий при эксплуатации насосных и компрессорных станций, являются:

- повышенный уровень вибрации трубопроводной обвязки нагнетателей;
- повышенный уровень вибрации трубопроводов систем торцового уплотнения, маслопроводов и других технологических систем;
- выход из строя или ложные срабатывания аппаратуры систем автоматики, управления и контроля;
- повышенный уровень шума, который превышает допустимое значение на 15–20 дБ.

По результатам исследования вибраций, осуществляемых специалистами ПАО «Газпром», можно сделать следующие выводы:

- максимальные уровни вибрации отмечаются на входных и выходных трубопроводах нагнетателей, значение которых может превышать 90 мм/с, и приводят к динамическим напряжениям около 25 МПа;
- в спектрах вибрации преобладают составляющие на лопаточных частотах нагнетателей в диапазонах от 700 до 2000 Гц и кратным им частотам;
- на трубопроводах систем торцового уплотнения нагнетателей отмечаются вибрации на насосной частоте с уровнем 40–60 мм/с, что соответствует динамическим напряжениям около 15 МПа.

Согласно официальной информации ПАО «Газпром», большая часть утечек природного газа (около 92 %) происходит в газораспределительных системах (ГРС), которые подвергаются динамическим нагрузкам в виде вибраций и ударов [3].

Сравнивая ситуации на магистральных газопроводах и газораспределительных системах, можно сказать, что положение на ГРС усугубляется за счет воздействия на трубопроводы вибраций, появляющихся на участках после автоматических регуляторов давления. Большая часть газораспределительных систем эксплуатируется с перегрузкой по объемному расходу газа. Из-за этого возникает значительное увеличение

скорости потока газа, которое в реальности зачастую превышает нормативные значения. Это явление ведет за собой повышение уровня вибраций и, как следствие, усталостное разрушение трубопроводов.

На данный момент большинство газопроводов российского топливно-энергетического комплекса (ТЭК) эксплуатируются уже более 30 лет и подходят к концу своего срока эксплуатации, в результате чего увеличивается вероятность возникновения аварий, которые, в свою очередь, несут за собой тяжелые социальные, экономические и экологические последствия.

Например, говоря об экономической составляющей, аварии, вызванные вибрацией, гидроударами и коррозией, ежегодно наносят ущерб в несколько сотен миллиардов долларов и около 50 тысяч тонн черных металлов.

Стоит также упомянуть про экологический ущерб, поскольку с каждым годом становится больше аварий с крупными потерями природных ресурсов и серьезными последствиями для окружающей среды. В результате коррозии и разрушения вследствие вибрации трубопровода убытки на магистральных нефтепроводах превосходят 1 миллион тонн в год. При этом во внимание не берутся потери при авариях внутрипромысловых трубопроводов.

К сожалению, по прогнозам специалистов, частота аварий на трубопроводах будет нарастать. Обусловлено это в первую очередь невозможностью одновременной замены миллионов километров труб даже при условии достаточного финансирования. В результате чего возникает острая проблема, связанная с повышением надежности и, как следствие, увеличением срока эксплуатации трубопроводов.

Повышение ресурса трубопроводов в значительной степени зависит от устранения вредных колебаний, приводящих к нарушению изоляционных покрытий, коррозионному растрескиванию, усталостному разрушению тела труб. В неблагоприятных случаях возможно катастрофическое разрушение трубопровода.

На сегодняшний день существует несколько мероприятий, используемых для решения данной проблемы. Один из таких способов основан на изменении жесткости конструкции за счет использования хомутов (рис. 1). Это позволяет уменьшить вероятность возникновения резонанса. Однако данный метод не рассчитан на полигармонические возбуждения.



Рис. 1. Хомут для крепления к трубе

Помимо хомутов при прокладке трубопроводов используются опоры на пружинах (рис. 2). Они предназначены для компенсации нагрузок, действующих

на трубопровод в результате сейсмического воздействия. Данные опоры сложны в эксплуатации, требуют точной настройки, а также имеют высокую себестоимость.

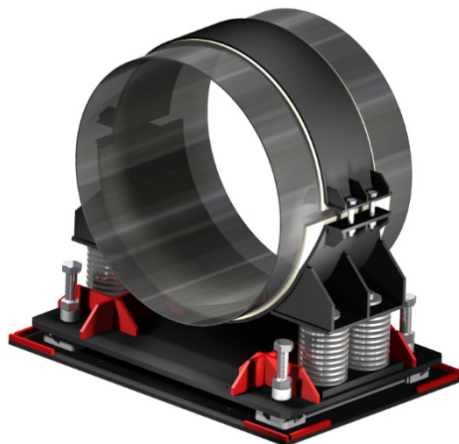


Рис. 2. Опора скользящая пружинная регулируемая (ОСПР)

Одним из распространенных методов демпфирования резонансных колебаний является покрытие трубопроводов заливками и вибропоглощающими материалами. Данный способ решает проблемы звуко- и виброизоляции, однако имеет ряд существенных недостатков: снижение ремонтпригодности, зависимость от резкого изменения температуры, сложность монтажа и другие.

Существует тенденция к замене металлических труб на пластиковые. Пластиковые трубы меньше проводят вибрации, защищены от коррозии. Однако данное мероприятие является довольно дорогостоящей процедурой.

Для обеспечения эффективной виброзащиты трубопроводов предлагается использовать дискретные рабочие среды (ДРС), обладающие диссипативными (или рассеивающими) свойствами в широком диапазоне частот [4]. Дискретная рабочая среда, придавая гетерогенность конструкции, может быть представлена в виде гранул, например полистирола, которым заполняется контейнер, разделенный на две половины для удобства монтажа.

Исследования показали, что наполнитель в виде гранул значительно повышает модуль упругости материала, но одновременно несколько уменьшает внутренние потери. Повышение вибропоглощающих свойств наблюдается при использовании наполнителей неправильной формы (чешуйки, слоистая или пористая структура) за счет трения между частицами.

Контейнер с дискретной средой может иметь несколько секций, которые будут отличаться по размеру и наполнению гетерогенными ДРС, что позволит соответственно гасить колебания разных гармоник.

Корпус устройства-контейнера изготавливается из полимерного материала для придания ему нержавеющих свойств при использовании в агрессивной среде, например при прокладывании подземных магистралей с грунтовыми водами. Контейнер (рис. 3, 4) состоит из двух частей – полых полуколец, свинчивающихся между собой с помощью болтов из некоррозионного материала или соединяющихся при помощи скоб.

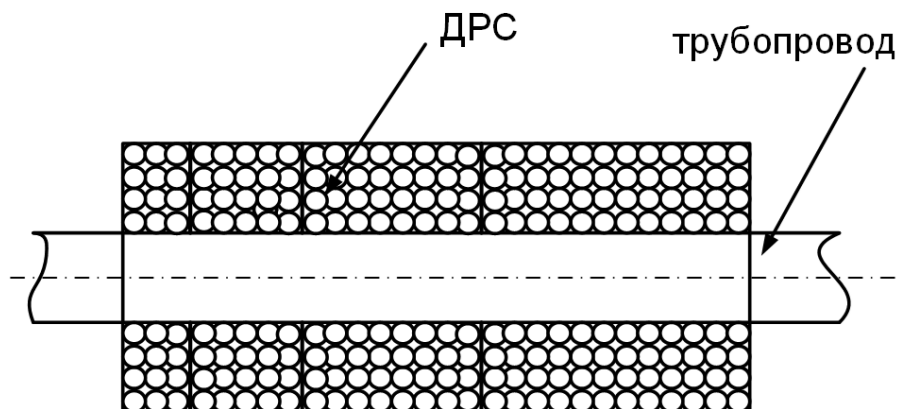


Рис. 3. Фронтальный вид контейнера с ДРС

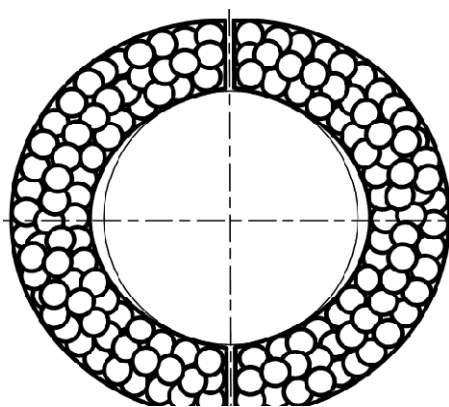


Рис. 4. Профильный вид контейнера с ДРС

По требованию заказчика контейнер может быть уже укомплектован необходимой дискретной средой и являться запаянным неразборным устройством либо иметь горловину для засыпки в нее дискретной среды.

Контейнер комплектуется герметичной пробкой для исключения попадания влаги или других инородных предметов, способных снизить эффективность диссипативных свойств дискретных сред и тем самым понизить виброзащитные свойства изделия.

Дискретная рабочая среда является самоприспосабливающейся системой. Она реагирует на изменение амплитуды колебаний основной системы, включаясь в работу при увеличении размаха амплитуды колебаний, и является перспективным классом новых материалов для применения в целях виброударозащиты изделий. Регулируя количество и качество состава гетероструктуры можно изменять механические свойства разработанного устройства виброзащиты.

Данное устройство может быть использовано в сфере ЖКХ, машиностроении, строительстве, в топливно-энергетическом комплексе (при прокладках нефтепроводов, газораспределительных систем). Кроме того, уже имеется договоренность об исполь-

зовании результатов исследований в проектно-конструкторской деятельности АО «Волгомост» Мостотряд № 20 в виде:

- технических предложений по выполнению конструктивных схем гасителей колебаний пролетных строений мостов;
- экспериментальных данных по исследованию гасителей колебаний на основе дискретных рабочих сред;
- методик расчета и моделирования гасителей колебаний на основе ДРС;
- эскизных проектов гасителей колебаний на основе ДРС;
- рекомендаций по использованию гасителей на ДРС.

Применение ДРС для обеспечения виброзащиты имеет ряд преимуществ: они способны устранять колебания в широком диапазоне частот, не требуют особой настройки и просты в эксплуатации, а устройство для гашения колебаний является ремонтнопригодным. Сравнительная характеристика методов по устранению колебаний трубопроводов приведена в таблице.

Сравнительная характеристика методов по устранению колебаний трубопроводов

Предложение / характеристика	Термостойкость	Необходимость точной настройки	Сложность в эксплуатации	Ремонтопригодность	Примерная себестоимость (руб.)
ДРС	да	нет	нет	да	5 000
Хомуты	да	нет	да	да	1 000
Изоляционный материал	да	нет	да	нет	4 000
Покрытие заливками	нет	нет	нет	нет	7 500
Опоры на пружинах	да	да	да	нет	10 000
Замена металлических труб на пластиковые	нет	нет	да	да	20 000

В заключение следует отметить, что ДРС стойки к резким изменениям температур и, кроме того, имеют относительно низкую себестоимость.

Литература

1. Куликов, В. Предотвращать, а не ликвидировать последствия / В. Куликов // Мировая энергетика. – 2008. – № 2. – С. 20–21.
2. Рукин, М. В. Анализ аварийных ситуаций на теплоэлектростанциях / М. В. Рукин // Системы безопасности. – 2015. – № 6 (126). – С. 106–108.
3. Кузьбожев, П. А. Совершенствование методов снижения вибраций в трубопроводах газораспреде-

тельных станций : специальность 25.00.19 «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кузьбожев Павел Александрович. – Ухта, 2019.

4. Динамика гетерогенных структур. Вибродарозащита гетерогенных структур. Том 3. / В. В. Смогунов, И. П. Климинов, О. А. Вдовикина, М. И. Вольников ; под редакцией В. В. Смогунова. – Пенза : Издательство Пензенского государственного университета, 2005. – Т. 3. – 497 с.

M.I. Volnikov, M.S. Gashitskiy
Penza State Technological University

CONTROL OF PIPELINES VIBRATION PROTECTION BASED ON DISCRETE ENVIRONMENT

The article deals with the problem of pipeline operation associated with prolonged exposure to vibration. Statistical data on accidents are provided, consequences and forecasts are described. The review of existing solutions with the description of advantages and disadvantages is carried out. As a result, a new technical solution, as well as a comparative analysis, was proposed.

Vibration, vibration protection, pipeline, accident, heterogeneous structure, discrete environment, vibration protection device



РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ НЕФТЯНЫХ ВЯЖУЩИХ НА ОСНОВЕ ГУДРОНОВ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ХОЛОДНЫХ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

В статье представлено обоснование эффективности применения холодных органоминеральных смесей в дорожном строительстве, приведены результаты выполненных работ по разработке новых экспериментальных составов нефтяного вяжущего. По результатам проведенных лабораторных исследований установлена возможность применения новых составов вяжущего для приготовления холодных органоминеральных смесей.

Нефтяное вяжущее, холодные органоминеральные смеси, нефтегравий, рыхлосвязные органоминеральные смеси.

Бурный рост интенсивности движения при одновременном увеличении транспортных нагрузок создал острую необходимость в повышении темпов строительства дорог с твердым покрытием, в том числе из асфальтобетона, на улицах городов и автомобильных дорогах общего пользования.

В настоящее время для устройства дорожных покрытий городских улиц и дорог используются, в основном, горячие асфальтобетонные смеси, для приготовления которых требуются высоковязкие битумы. Стоимость этих битумов очень высока. Асфальтобетонные смеси, изготавливаемые на их основе, предусматривают нагрев до высоких температур (до 150 °С) как вяжущего, так и минерального материала, что приводит к значительным энергетическим и материальным затратам. Вместе с тем применение горячего асфальтобетона не только в покрытиях основных магистралей, но и в покрытиях второстепенных улиц, проездов, дорожек, дворов и других объектов благоустройства является традиционным.

Кроме рационального использования дорогостоящих битумов остро стоит вопрос о продлении сроков производства работ в дорожном строительстве. Дорожное строительство до настоящего времени носит сезонный характер, что в значительной степени снижает использование дорожно-строительной техники и мешает созданию постоянных квалифицированных кадров.

Одним из направлений в решении этого вопроса, связанного с продлением сроков строительства, а в перспективе и ликвидации сезонности дорожно-строительных работ, может быть использование холодных органоминеральных смесей, благодаря их следующим преимуществам по сравнению с горячими асфальтобетонными смесями.

1. Способность сохранять рыхлость длительное время после изготовления. Сохранение рыхлости неограниченное время облегчает транспортирование холодных смесей на большие расстояния любым видом транспорта и обуславливает возможность изготовления таких смесей в течение всего года. Материал может заготавливаться заблаговременно и храниться

на складах завода или на промежуточных базах в течение продолжительного времени, а затем применяться в любых количествах для устройства новых и ремонта старых асфальтобетонных дорожных покрытий. Материал может изготавливаться в крупных промышленных масштабах заводским путем, с применением современного оборудования и технологических процессов, обеспечивающих высокие технико-экономические показатели. Это дало бы возможность отказаться от сезонной работы асфальтобетонных заводов и заранее обеспечить дорожно-строительные организации сырьевыми ресурсами на полный фронт выполняемых работ. При складировании холодной органоминеральной смеси заранее на местах производства работ уменьшается количество необходимых транспортных единиц для перевозки смеси и использование их в течение года становится равномерным.

2. Способность хорошо уплотняться в тонком слое, что выгодно отличает их от смесей, укладываемых в горячем состоянии. Последние после укладки тонким слоем быстро остывают, и надлежащее уплотнение их при устройстве покрытия затрудняется, что часто порождает низкое качество устраиваемых покрытий.

3. Способность уплотняться в покрытиях при температуре, соответствующей температуре окружающего воздуха (до +5 °С), под воздействием легких катков и колес автомобилей.

4. Устойчивость против образования трещин. Это обеспечивается, с одной стороны, малой вязкостью вяжущего, входящего в состав холодных органоминеральных смесей, а с другой стороны – особенностями их структуры в уплотненном состоянии (большой подвижностью частей). Покрытия из таких смесей, как правило, не подвержены образованию пластических деформаций (сдвигов, колея), так как вследствие меньшего содержания вяжущего холодные органоминеральные смеси обладают высоким коэффициентом трения.

Опыт приготовления холодных асфальтобетонных и органоминеральных смесей в нашей стране показывает, что данные типы смесей изготавливают на

основе жидких битумов. Жидкие битумы, как правило, получают путем разжижения вязких битумов. В качестве разжижителя используют бензин, технический керосин, дизельное топливо (солярка), мазут и т.д. Холодные смеси, приготовленные на основе этих вязких, на начальных стадиях эксплуатации характеризуются высокой трещиностойкостью за счет сниженной вязкости вяжущего. Однако с течением времени, по мере испарения разжижителя (особенно бензина и технического керосина) битум приобретает свои первоначальные свойства.

Учитывая, что холодные смеси приготавливают при меньшем содержании вяжущего, и испарение разжижителя способствует дальнейшему утоньшению слоя пленки вяжущего на поверхности минеральных зерен, можно ожидать ускорения процесса окисления битума на минеральной поверхности и, следовательно, снижения срока службы покрытий.

Данное положение обуславливает разработку таких составов вяжущих, свойства которых в течение долгого времени не подвергались бы изменению.

Для решения этой проблемы в настоящее время в Финляндии путем компаудирования разработано вяжущее, в состав которого входят: легкий битум (гуд-

рон), петролевая фракция (масла), газойлевая фракция (моторное топливо). С целью улучшения адгезии в состав вяжущего вводят аминные добавки. Смеси на основе таких вяжущих («нефтегравий») характеризуются высокой рентабельностью и технологичностью. Установлено, что при применении «нефтегравия» обеспечивается долговечность покрытия до 20 лет.

Аналогом «нефтегравия» в нашей стране является рыхлосвязная органоминеральная смесь, разработанная в управлении «Ленавтодор» (г. Санкт-Петербург). Смесь приготавливают на основе нефтяного вяжущего, получаемого на АО «Битран» (г. Ухта).

С учетом зарубежного и отечественного опыта нами в сотрудничестве с ООО НПЦ «Оникс» была поставлена задача по разработке собственного нефтяного вяжущего и проектированию составов холодных органоминеральных смесей на его основе для устройства покрытий местных дорог Вологодской области.

В качестве ориентира при разработке собственного нефтяного вяжущего принимались требования технических условий, разработанных на данный вид продукции [4].

Согласно [4], к нефтяному вяжущему предъявляются требования, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Основные требования, предъявляемые к нефтяным вяжущим

Показатели	Единицы измерения	Требования к нефтяному вяжущему	Методы испытаний
Условная вязкость при 60 °С	с.	14–24	ГОСТ 11503-74
Кинематическая вязкость при 60 °С	мм ² /с	350–650	ГОСТ 33-2016
Отгонка-дистиллят (без воды) от первоначального количества	% от объема		ГОСТ 2177-99
до 225 °С		0	
до 260 °С		≤ 1,0	
до 315 °С		≤ 8,0	
до 360 °С		≤ 12,0	
Вязкость остатка при 60 °С	мм ² /с	2000–4000	ГОСТ 33-2016
Относительная плотность	кг/м ³	не нормируется	

Таблица 2

Результаты испытаний свойств составов нефтяных вяжущих

Показатели	Единицы измерения	Результаты испытаний составов				Требования ТУ
		Эталонный состав 1	Эталонный состав 2	Экспериментальный состав 1	Экспериментальный состав 2	
Условная вязкость при 60 °С	с.	41	44	24	24	14–22
Кинематическая вязкость при 60 °С	мм ² /с	318	325	499	495	350–650
Отгонка-дистиллят (без воды) от первоначального количества	% от объема					
до 225 °С		0	0	0	1	≤ 0
до 260 °С		0	1	0	0	≤ 1
до 315 °С		6,6	4	0	0	≤ 8
до 360 °С		17	16	25	26,5	≤ 12
Вязкость остатка при 60 °С	мм ² /с	1910	1982	3027	3118	2000–4000
Относительная плотность	кг/м ³	1207	1209	1295	1288	не норм.

Работа по получению нефтяного вяжущего для приготовления холодных органоминеральных смесей предусматривала изготовление вяжущего из возможных имеющихся в распоряжении дорожных организаций компонентов, таких как битум, гудрон, мазут, машинное масло, дизельное топливо.

В начале исследований проводились поисковые работы по изучению методики проведения испытаний и определения физико-механических свойств исходных компонентов.

Кроме того, проводились испытания эталонного вяжущего, разработанного в АО «Битран», а также двух экспериментальных составов, приготовленных нами в лабораторных условиях, на основе теоретических представлений о составе нефтяного вяжущего.

Для приготовления экспериментальных составов в определенных соотношениях компонентов были использованы: гудрон марки СБ Ухтинского НПЗ, мазут топочный марки 100Б из котельной Вологодской ТЭЦ, отработанное машинное масло и зимнее дизельное топливо Ярославского НПЗ.

Для проведения испытаний был выбран основной показатель – количество дистиллята от первоначального объема вяжущего по [1]. Кроме того, определялись условная вязкость образцов до и после перегонки по [2], а также кинематическая вязкость по [3]. В таблице 2 представлены результаты проведенных испытаний свойств вяжущих.

Анализ результатов испытаний показывает, что выбранные эталонные составы по многим показателям не отвечают требованиям технических условий, тогда как экспериментальные составы в большей степени соответствуют стандарту. Исключение при этом

составляет отгоняемый дистиллят при температуре жидкости до 360 °С. Этот показатель несколько превышает допускаемые нормы. Однако следует отметить, что аналогичная тенденция сохраняется и для эталонных составов.

Кроме того, в интервалах температуры отгонки до 220 °С, до 260 °С и до 315 °С у экспериментальных составов испарение легких фракций по сравнению с эталонными составами практически отсутствует. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что экспериментальные составы нефтяного вяжущего по сравнению с эталонными вяжущими будут обладать большей термостойкостью при низких интервалах температурного режима. Следовательно, можно полагать, что холодные органоминеральные смеси на основе экспериментальных составов нефтяного вяжущего должны обладать высокой стабильностью свойств в течение длительного отрезка времени.

Литература

1. ГОСТ 2177-99. Нефтепродукты. Методы определения фракционного состава : введен 2001-01-01. – Минск : Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1999. – 24 с.
2. ГОСТ 11503-74. Битумы нефтяные. Метод определения условной вязкости : введен 1976-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 4 с.
3. ГОСТ 33-2016. Нефть и нефтепродукты. Прозрачные и непрозрачные жидкости. Определение кинематической и динамической вязкости : введен 2018-07-01. – Москва : Стройинформ, 2017. – 35 с.
4. ТУ 0256-095-0151806-95. Вяжущее нефтяное для органоминеральных смесей-НВ.

N.N. Gabibov, V.A. Shapkina, A.N. Gabibova
Vologda State University

DEVELOPMENT OF TAR-BASED OIL BINDERS FOR COLD ORGANIC-MINERAL MIXTURES PREPARATION

The article presents the rationale for the effectiveness of using cold organomineral mixtures in road construction, and presents the results of work performed on the development of new experimental compositions of oil binder. The results of laboratory studies have established the possibility of using new binder compositions for the preparation of cold organomineral mixtures.

Oil astringent, cold organo-mineral mixtures, netegrity, ryglowanie organic compounds.



*А.В. Калайдо¹, В.И. Римшин²,
М.Н. Семенова², Г.С. Быков³*

¹Луганский государственный педагогический университет,

²Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН,

³Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва

АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНОГО ОПЫТА ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДОНОВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ (НА ПРИМЕРЕ США)

Работа выполнена в рамках НИР 2020 года Российской академии архитектуры и строительных наук по теме «7.4.10 – Теоретическое исследование накопления радона в помещениях»

Большую часть годовой дозы радиоактивного облучения человек получает в зданиях от радона и его дочерних продуктов распада. С целью ограничения ущерба здоровью населения от радона санитарным законодательством установлены его предельно допустимые уровни в воздухе помещений, соблюдение которых достигается проектированием подземной оболочки здания с высоким сопротивлением переносу радона. Но подобный подход применим только к строящимся зданиям, тогда как проблема нормализации радоновой обстановки в существующих зданиях не менее актуальна. В статье проанализирован опыт обеспечения радонобезопасности эксплуатируемых зданий на территории США – одного из мировых лидеров в вопросах защиты населения от радона.

Радон, дочерние продукты распада, предельно допустимые уровни, сопротивление переносу, радонобезопасность эксплуатируемых зданий.

Радон – благородный радиоактивный газ, из всех его изотопов угрозу коллективному здоровью населения несет только ²²²Rn, основной естественный изотоп с периодом полураспада 3,8 дня. Относительно большой период полураспада позволяет радону-222 поступать в здания извне и накапливаться в воздухе помещений нижнего этажа в опасных концентрациях. Радон и его продукты распада негативно воздействуют на органы дыхания человека, длительное пребывание в помещениях с высокими уровнями радона может стать причиной возникновения рака легкого [1–2].

Поскольку реальную угрозу здоровью облучаемых в быту создают пренебрежимо малые массовые концентрации радона во внутреннем воздухе, то для оценки его содержания используют объемную активность (ОА) радона, которая пропорциональна его массе. В европейских странах ОА измеряется в беккерелях на метр кубический (Бк/м³), в США – в пикокюри на литр (пКи/л), взаимный переход осуществляется следующим образом:

$$1 \text{ пКи/л} = 37 \text{ Бк/м}^3.$$

В РФ содержание радона оценивается по активности его дочерних продуктов распада (ДПР), поэтому предельно допустимые уровни установлены в единицах эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) ДПР радона, которая связана с объемной активностью радона соотношением

$$\text{ЭРОА} = F \cdot \text{ОА},$$

где F – коэффициент сдвига радиоактивного равновесия.

Для величин ОА и ЭРОА не существует однозначного перехода, так как коэффициент F зависит от

условий воздухообмена в конкретном помещении и может принимать значения в диапазоне от 0 до 1. Если величина F неизвестна, то в расчетах его значение следует принимать равным 0,4 согласно рекомендациям Международной комиссии по радиологической защите [3].

Процесс накопления радона в зданиях является многофакторным, на его характер влияют геофизические характеристики грунта под зданием, особенности конструкции и эксплуатации зданий и т.д. [4–6]. Поэтому в разных странах установлены собственные предельно допустимые величины ОА радона в быту: США – 4 пКи/л ($\approx 150 \text{ Бк/м}^3$), Германия – 200 Бк/м³, Бельгия – 300 Бк/м³, Финляндия – 400 Бк/м³ для существующих зданий и 100 Бк/м³ для строящихся [7]. В РФ также действует двухуровневый норматив, согласно которому величина ЭРОА продуктов радона не должна превышать 200 Бк/м³ для существующих зданий и 100 Бк/м³ для строящихся (в единицах ОА это 500 и 250 Бк/м³, соответственно). Всемирной организацией здравоохранения предложен эталонный уровень радона в помещениях ОА = 100 Бк/м³, при превышении которого рекомендуется проведение мероприятий по нормализации радоновой обстановки.

В США, как и в большинстве других развитых стран с умеренным климатом, облучение радоном в быту признано общенациональной проблемой, требующей комплексного решения. На государственном уровне вопросы обеспечения радоновой безопасности зданий находятся в ведении Агентства по защите окружающей среды (US EPA), разрабатывающего мероприятия по радоновому картированию территории страны и снижению уровней радона в зданиях. По оценкам US EPA, ежегодно около 21 000 смертей от

рака легкого в США могут быть вызваны бытовым облучением радоном и его ДПР.

Практически весь радон поступает в здание из грунта под ним, поэтому разрабатываемые защитные мероприятия направлены на снижение переноса почвенного газа через подземную оболочку здания. Случаи, когда избыточное содержание радона в помещении вызвано его выделением из материалов ограждающих конструкций, либо поступлением с водой, газом или наружным воздухом, являются экстраординарными и не требуют разработки комплекса защитных мероприятий.

Перенос радона из грунта в здания может осуществляться посредством диффузии и/или конвекции (адвекции), причем каждый из механизмов может быть доминирующим в зависимости от физико-механических характеристик грунта и конструкции подземной оболочки здания. Понимание закономерностей поступления радона в здания является ключевым в обеспечении их радоновой безопасности, так как каждому из механизмов переноса соответствуют свои радонозащитные технологии (табл.).

Таблица

Основные радонозащитные технологии

Механизм переноса	Технологии радонозащиты	
	Активные	Пассивные
Диффузионный	Активное разрежение почвы, вентиляция грунтового основания здания, принудительная вентиляция жилой зоны, создание избыточного давления в жилой зоне или подвале, радоновые колодцы и т.д.	Использование материалов с низким коэффициентом диффузии радона в них
Конвективный		Заделка щелей и стыков в фундаменте, устранение связи между почвенным воздухом и внутренним объемом помещения

На протяжении 30 лет в США проводились интенсивные исследования, посвященные установлению доминирующего механизма переноса радона в здания, финансируемые US EPA и Департаментом энергетики. По их результатам US EPA было заявлено, что поступление радона в помещения осуществляется под действием перепада давления снаружи и внутри здания через щели и трещины в фундаментных плитах. Данное утверждение было закреплено законодательно наряду с положением, что радоновая безопасность здания может быть полностью гарантирована лишь в случае применения активных технологий защиты от радона.

Порядок обеспечения радоновой безопасности существующих зданий в США регламентируется национальным радоновым стандартом, действие которого распространяется на все здания, имеющие не более трех этажей в высоту. Подобные здания относятся к типу одно-, двухсемейных или таунхаусов, их общей чертой является наличие не более четырех жилых комнат на общем фундаменте.

В соответствии с указанным выше стандартом, все существующие жилые малоэтажные дома на территории США должны быть оборудованы системой снижения поступления почвенного газа (Soil Gas Mit-

igation system), если объемная активность радона в них превышает национальный контрольный уровень в 150 Бк/м³. Основными функциями данной системы являются:

- снижение уровней радона в зданиях до значений, не превышающих международный, национальный, федеральный или другой референтный уровень, действующий на данной территории;

- снижение содержания в воздухе помещений других опасных газов и паров, поступающих из грунта, до значений, не превышающих предельно допустимые концентрации, установленные санитарным законодательством на данной территории;

- создание разрежения (зоны пониженного давления) в почве под зданием.

В США основным принципом обеспечения радоновой безопасности существующих зданий является устранение возможной опасности во избежание опасности подтвержденной. Данный принцип реализуется за счет применения технологии активного разрежения почвы (Active soil depressurization, ASD) – системы мероприятий по ограничению поступления радона за счет создания вентилятором зоны пониженного давления в грунте под плитой или мембраной.

Для конструкции пола с монолитной плитой основания (плавающая плита, плита на ростверке, плита над подполом) защита от избыточного поступления радона из грунта строится на *разрежении под плитой основания* (Sub-slab depressurization) – методе уменьшения поступления радона за счет поддержания более низкого давления воздуха под плитой основания, чем над ней при помощи вентилятора, отбирающего воздух из-под плиты. Данный метод имеет следующие конструктивные разновидности.

1. *Всасывающая яма* (suction pit) – полость объемом не менее 7 дм³ (7 л) создается под плитой основания в месте ввода всасывающего трубопровода (рис. 1а). Для более эффективного удаления радона слой под плитой должен иметь высокую воздухопроницаемость (порядка 10⁻⁹÷10⁻¹⁰ м²), для обеспечения данных условий наиболее подходит слой гравия толщиной 10...15 см. Во избежание поступления радона в жилую зону, неплотности в месте ввода всасывающей трубы герметизируются эпоксидной смолой или полимерной мастикой.

2. *Дренаж* (drain-tile) – в данном случае всасывающий трубопровод непосредственно отбирает почвенный воздух из дренажного слоя, образованного материалом с высокой воздухопроницаемостью (рис. 1б). В качестве дренажного материала принято использовать крупный гравий или геотекстиль.

3. *Колодец* (sump) – полость с почвенным воздухом не соединяется на прямую с всасывающим трубопроводом, ввод которого герметизируется крышкой из гибкого эластичного материала (рис. 1в). Недостатком подобной схемы является шум от работы системы ASD и утечки почвенного воздуха в жилые помещения.

При использовании в конструкции пола сплошного листового полимера (мембраны), размещаемого по фундаменту дома, метод снижения поступления радона из грунта носит название *подмембранного разрежения* (Sub-membrane depressurization). Его суть со-

стоит в поддержании более низкого давления воздуха в пространстве под мембраной замедлителя грунтового газа при помощи вентилятора системы активного разрежения почвы, отбирающего воздух из-под мембраны (рис. 2а).

Разрежение нежилого пространства (Non-habitable air space depressurization) используется при наличии в конструкции здания подпола – открытой области под жилым пространством, образованной бетонной плитой основания и грунтом (рис. 2б). Подпол чаще всего имеет высоту от 10 см до 1 м, он может проветриваться наружным воздухом или быть герметичным. Данный метод не используется для снижения поступления радона в здания, если подпол не изолирован от наружного воздуха.

Разрежение в пустотелых стенах (Block wall depressurization) используют из-за наличия воздушных полостей в них, а расположение всасывающей трубы в этом случае определяется характером размещения этих пустот в стенах и возможностью их герметизации (рис. 2в). При использовании данного метода пустоты в стенах должны быть надежно изолированы от поступления в них воздуха из помещения, открытой должна оставаться только сторона, прилегающая к грунтовому массиву.

При установке системы ASD в здании обязательным требованием является то, что элементы контура избыточного давления не должны проходить через жилую зону или под ней (рис. 3а).

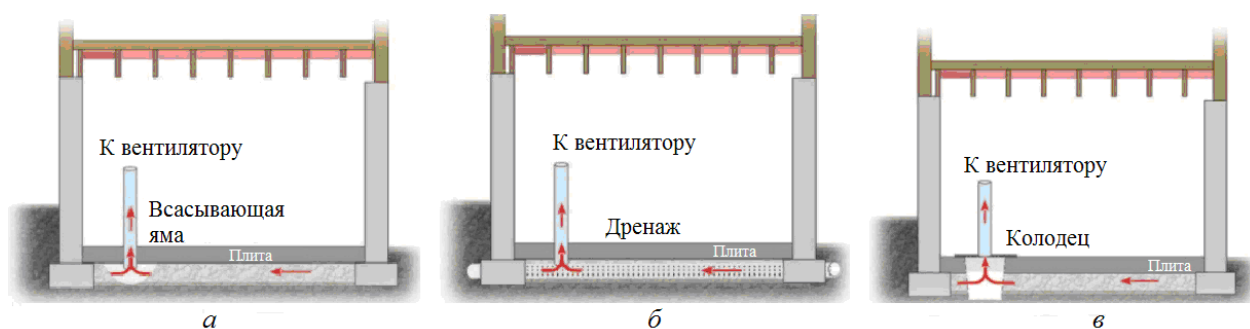


Рис. 1. Метод разрежения под плитой основания:
а – всасывающая яма; б – дренаж; в – колодец

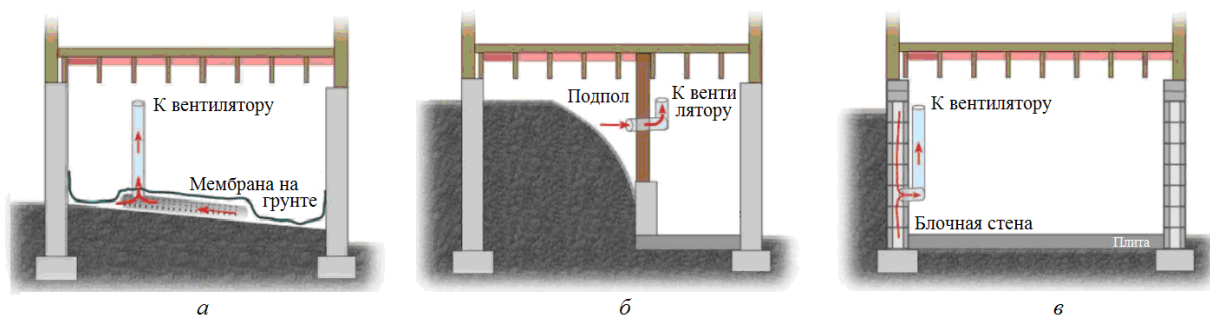


Рис. 2. Методы разрежения:
а – подмембранное; б – нежилого пространства; в – блочной (пустотелой) стены

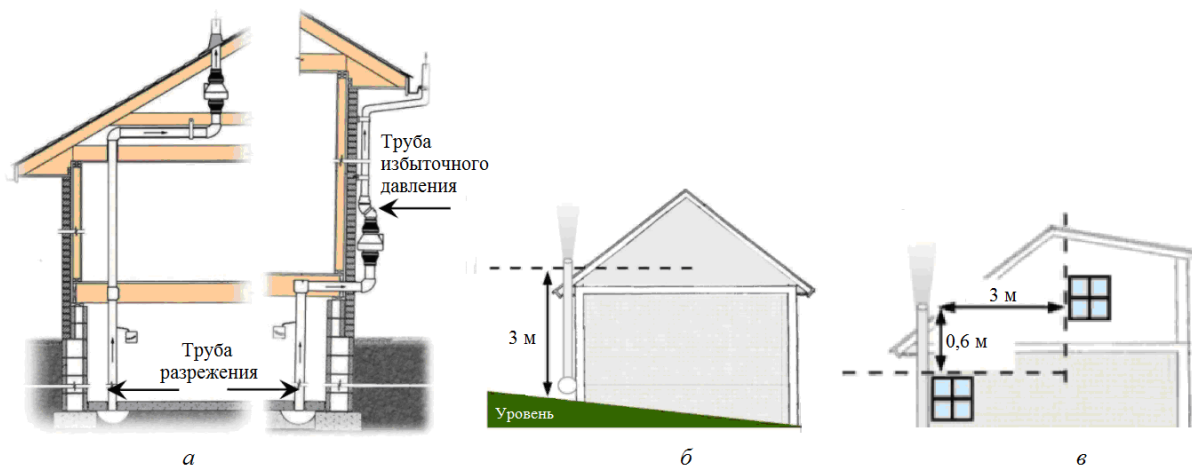


Рис. 3. Установка элементов системы активного разрежения почвы:
а – контура избыточного давления; б, в – точки удаления почвенного газа

Место установки точки выброса почвенного газа должно выбираться таким образом, чтобы по возможности минимизировать повторное поступление радона в жилую зону и облучение жильцов отведенным радоном за пределами здания. Для этого она должна располагаться не ближе 3 м над ближайшей зоной разрежения (рис. 3б), а также не менее 0,6 м над и не менее 3 м от ближайших проемов в ограждающих конструкциях здания, таких как окна, двери, каналы естественной вентиляции и т.д. (рис. 3в).

На территориях, для которых характерно повышенное содержание радона в воздухе помещений, стандартом предусматривается дополнительное использование двух активных методов радонозащиты, не связанных с активным разрежением почвы.

1. *Повышение внутреннего давления* (Indoor air pressurization) – создание и поддержание более высокого давления воздуха в жилой зоне, отделенной от грунта, которое при определенных условиях эффективно препятствует поступлению почвенного воздуха. При помощи механической вентиляции воздух из верхних этажей или снаружи здания подается к газопроницаемому слою под фундаментом или в воздушное пространство, находящееся в контакте с грунтом.

2. *Разбавление почвенного воздуха* (Soil gas dilution) – состоит в снижении концентрации радона в почвенном воздухе посредством разбавления его наружным воздухом с низким содержанием радона. Естественная или механическая вентиляция подает наружный воздух в газопроницаемый слой под фундаментом или в воздушное пространство, находящееся в контакте с грунтом.

Выполненный анализ опыта обеспечения радонобезопасности зданий в США показал, что в основе разработки средств и методов радонозащиты лежит постулат о безусловном доминировании конвективного поступления радона в здания и сооружения, который не является общепризнанным даже среди американских исследователей, хотя и закреплен на законодательном уровне. В результате активное разрежение почвы рекомендовано US EPA как единственное надежное средство защиты от конвективного поступления грунтового радона.

Активные методы радонозащиты, основанные на удалении радона из грунта под зданием или из воздуха нежилой зоны, являются достаточно надежными при практически любом содержании радия в грунте. Но они дороги и энергозатратны, аппаратура ASD-систем является источником шумов и вибраций, а ее монтаж требует внесения изменений в конструкцию здания. В то же время американский опыт использо-

вания активных систем радонозащиты может с успехом быть применен в России при строительстве малоэтажного жилья на радоноопасных территориях, где обеспечение благоприятной радоновой обстановки в зданиях исключительно посредством пассивных технологий крайне проблематично или попросту невозможно.

Литература

1. ICRP Publication 115. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon / ed. C. H. Clement // *Annals of the ICRP*. – 2010. – Vol. 40 (1). – 64 p.

2. Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies / Darby S., Hill D., Auvinen A. [et al.] // *British Medical Journal*. – 2005. – P. 223–227.

3. ICRP: Protection against radon-222 at home and work. International Commission on Radiological Protection Publication 65. Pergamon, 1994. – 89 p.

4. Гулабянц, Л. А. Математическая модель формирования радоновой обстановки в здании / Л. А. Гулабянц, А. В. Калайдо, М. И. Лившиц // *АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений*, 2017. – № 1 (88). – С. 41–49.

5. Гулабянц, Л. А. Принцип построения новых норм проектирования противорадоновой защиты зданий / Л. А. Гулабянц // *Благоприятная среда жизнедеятельности человека. Строительные науки*, 2009. – № 5. – С. 461–467.

6. Радоновая безопасность зданий / М. В. Жуковский, А. В. Кружалов, В. Б. Гурвич, И. В. Ярмошенко. – Екатеринбург : УрО РАН, 2000. – 180 с.

7. Barros, N. Utility of short-term basement screening radon measurements to predict year-long residential radon concentrations on upper floors / Barros N., Steck D. J., William Field R. // *Radiation Protection Dosimetry*. – 2016. – 171 (3) – P. 405–413.

8. Мосаков, Б. С. Основы технологической механики тяжелых бетонов / Б. С. Мосаков, В. Л. Курбатов, В. И. Римшин. – *Минеральные Воды*, 2017. – 209 с.

9. Основные проблемы эксплуатации крупнопанельных зданий и пути их решения / М. В. Грязнов, М. В. Попова, А. В. Власов [и др.] // *Естественные и технические науки*. – 2014. – № 9–10 (77). – С. 355–357.

10. Варламов, А. А. Модели поведения бетона. Общая теория деградации. Для студентов инженерно-строительных факультетов, получающих образование по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство» / Варламов, А. А., Римшин В. И. – Москва : ИНФРА-М, 2019. – 435 с.

A.V. Kalaydo¹, V.I. Rimshin², M.N. Semenova², G.S. Bykov³
Luhansk State Pedagogical University¹, Research Institute of Building Physics RAASN²,
Mordovia State University named after N.P. Ogarev³

ANALYSIS OF FOREIGN EXPERIENCE IN ENSURING RADON SAFETY OF OPERATED BUILDINGS (ON THE EXAMPLE OF THE UNITED STATES OF AMERICA)

Most of the annual dose of radiation a person receives in buildings from radon and its daughter products of decay. In order to limit the damage to public health from radon, the sanitary legislation sets its maximum permissible levels in the air of premises, the observance of which is achieved by designing the underground shell of a building with a high

resistance to radon transport. But this approach is only applicable to buildings under construction, while the problem of normalizing the radon situation in existing buildings is no less urgent. The article analyzes the experience of ensuring radon safety of operated buildings in the United States – one of the world leaders in protecting the population from radon.

Radon, daughter decay products, maximum permissible levels, transport resistance, radon safety of operated buildings.



КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА ОТОПЛЕНИЯ ЗИМНЕЙ ТЕПЛИЦЫ

В статье рассмотрена комбинированная система отопления зимней теплицы, которая включает в себя два различных источника тепловой энергии: инфракрасный излучатель и воздухонагреватель. За счет первого источника теплоты формируется требуемый тепловой режим почвы, за счет второго – необходимый тепловой режим помещения зимней теплицы, определяемый температурой внутреннего воздуха. При этом особый интерес представляет газовое отопительное оборудование, так как в этом случае возможна утилизация теплоты от продуктов сгорания газообразного топлива и получение углекислого газа (CO_2) для реакции фотосинтеза растений.

Комбинированная система отопления; газовый инфракрасный излучатель; газовый воздухонагреватель; почва; зимняя теплица.

Несмотря на то, что зимние теплицы являются наиболее совершенными сооружениями защищенного грунта, они не лишены недостатков. В первую очередь из-за применения тонких светопрозрачных конструкций (органического стекла, поликарбоната и т.п.), которые обладают низкими теплозащитными свойствами [1, 2]. Это отрицательно сказывается на тепловых потерях помещения, а значит и на тепловой мощности отопительного оборудования. Еще одна важная проблема – вентиляция, которая необходима для удаления избыточной влаги и воздушного питания растений (фотосинтеза). Дело в том, что для организации воздухообмена, как правило, используется наружный воздух, который предварительно требуется нагреть (особенно в зимний период года). Все это сказывается на микроклимате зимней теплицы (температуре внутреннего воздуха и почвы), который, вообще говоря, должен быть постоянным и независимым от переменных факторов окружающей среды [3].

Традиционные системы отопления (водяные, воздушные) морально устаревают в виду их громоздкости, инертности, металлоемкости, необходимости подключения к внешним источникам теплоты (тепловым сетям), поэтому активно развиваются новые энергоэффективные технологии теплоснабжения тепличного хозяйства с применением солнечных коллекторов [4], тепловых насосов [5], геотермальных [6] и пиролизных [7] установок. Сюда также можно отнести использование потолочных инфракрасных излучателей, которые позволяют равномерно обогреть почву и выдерживать требуемый температурный режим для выращивания рассады или овощных культур. Однако, как показали проведенные исследования, применение для отопления зимней теплицы исключительно длинноволновых инфракрасных излучателей не является целесообразным решением, так как пассивные источники теплоты (в данном случае почва и

ограждение теплицы) не могут нагреть воздух помещения до требуемых температур. Особенно это критично в зимний период отопительного сезона, когда температура наружного воздуха может опускаться ниже отметки в $-30\text{ }^\circ\text{C}$. Возможным решением данной проблемы является комбинация отопительных систем, где обогрев почвы осуществляется за счет инфракрасных излучателей (лучистое отопление), а требуемый тепловой режим помещения поддерживается за счет предварительного нагрева наружного воздуха в воздухонагревателе (конвективное отопление). Таким образом, автономная комбинированная система отопления формирует оптимальный микроклимат зимней теплицы в любой период года. В качестве горючих материалов имеет смысл использовать газообразное топливо (природный газ, сжиженный углеводородный газ), так как, во-первых, возможна утилизация теплоты продуктов сгорания, а во-вторых, подача углекислого газа (CO_2) в теплицу для жизнеобеспечения растений в закрытом грунте (осуществление фотосинтетических реакций).

На рисунке 1 представлена расчетная схема комбинированной системы отопления зимней теплицы.

В комбинированной системе отопления зимней теплицы имеют место два источника теплоты: лучистый – газовый инфракрасный излучатель (3) с тепловым потоком $Q_{\text{изл}}$, Вт, и конвективный – газовый воздухонагреватель (4) с тепловым потоком $Q_{\text{вп}}$, Вт, и температурой приточного воздуха $t_{\text{пр.в}}$, $^\circ\text{C}$. Комбинация двух нагревательных элементов позволяет поддерживать заданный тепловлажностный режим зимней теплицы, определяемый температурой $t_{\text{вн.в}}$, $^\circ\text{C}$, и относительной влажностью $\phi_{\text{вн.в}}$, %, внутреннего воздуха, а также температурой поверхности почвы (1) $t_{\text{пов}}$, $^\circ\text{C}$. Часть теплоты величиной $Q_{\text{изл}}$ поглощается

поверхностью почвы (1), а часть (не указана на рис. 1) – отражается в направлении к внутренней поверхности ограждения (2) зимней теплицы, имеющей температуру $t_{огр}$. Кроме того, тепловой поток $Q_{луч}$ передается излучением внутренней поверхности ограждения (2) зимней теплицы от более нагретой поверхности почвы (1). Тепловые потоки на поверхности почвы (1), вызванные конвективным теплообменом $Q_{конв}$ и испарением влаги $Q_{исп}$, направлены в помещение зимней теплицы. Тепловые потери в зимней теплице связаны с теплопередачей $Q_{огр}$ через ограждение (2) в окружающую среду с температурой и относительной влажностью соответственно $t_{н.в}$ и $\Phi_{н.в}$, а также в грунт $Q_{гр}$. Тепловой поток $Q_{вент}$ уходит вместе с воздухом через вытяжной вентиляционный проем (5).

В зимней теплице осуществляется равномерный полив поверхности почвы (1). Расход воды на нужды орошения $G_{пол}$, кг/ч, определяется расчетным способом и направлен на поглощение влаги растениями (на рис. 1 условно не показаны) $G_{полл}$ и на испарительные процессы $G_{исп}$, происходящие на поверхности почвы (1). Поддержание заданного баланса влаги на поверхности почвы (1) за счет равенства приходных $G_{полл}$ и расходных $G_{полл}$ и $G_{исп}$ статей позволяет со-

хранять постоянным ее влагосодержание $W_{пов}$, кг/кг. Влажность внутреннего воздуха также остается постоянной, так как влага $G_{исп}$, испарившаяся с поверхности почвы (1), расходом $G_{вент}$ уходит вместе с вытяжным воздухом через вытяжной вентиляционный проем (5).

В таком случае уравнение теплового баланса зимней теплицы при комбинированном отоплении (рис. 1) будет иметь вид:

$$Q_{общ} = Q_{изл} + Q_{вп} = Q_{огр} + Q_{вент} + Q_{гр}, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где $Q_{общ}$ – общая (суммарная) тепловая мощность комбинированной системы отопления зимней теплицы, Вт; $Q_{изл}$ – тепловая мощность газового инфракрасного излучателя (3), Вт; $Q_{вп}$ – тепловая мощность газового воздухонагревателя (4), Вт; $Q_{огр}$ – потери теплоты теплопередачей через ограждение (2) зимней теплицы, Вт; $Q_{вент}$ – потери теплоты с вентиляционным воздухом, уходящим из зимней теплицы через вытяжной вентиляционный проем (5), Вт; $Q_{гр}$ – потери теплоты в грунт, Вт.

Рассмотрим на примере промышленной теплицы «Фермер 7.5» (рис. 2) метод расчета комбинированной системы отопления.

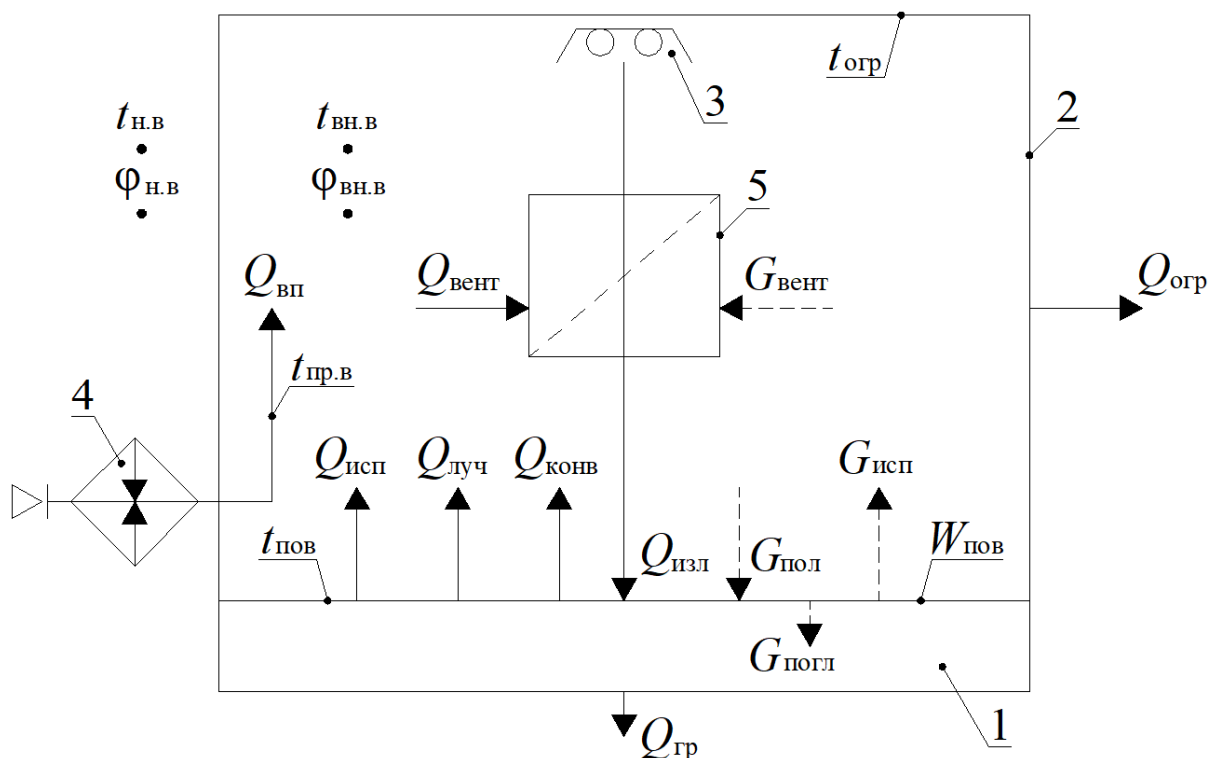


Рис. 1. Комбинированная система отопления зимней теплицы:
1 – почва; 2 – ограждение; 3 – газовый инфракрасный излучатель;
4 – газовый воздухонагреватель; 5 – вытяжной вентиляционный проем

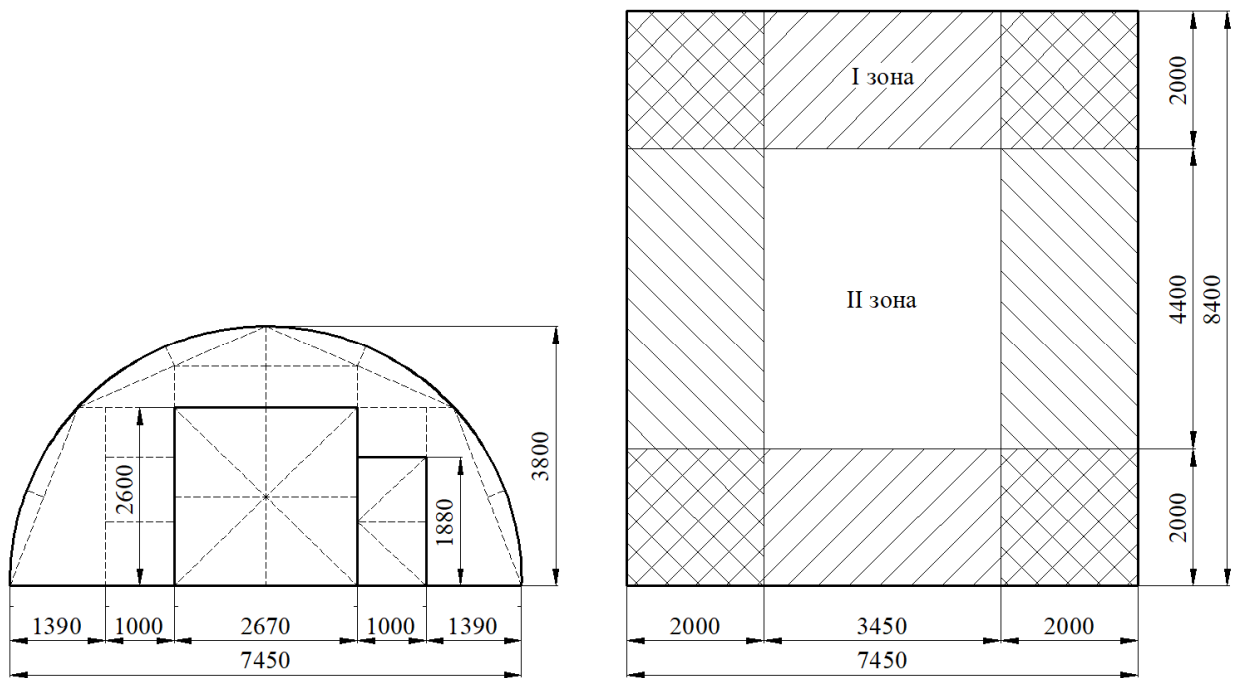


Рис. 2. Промышленная теплица «Фермер 7.5» и схема разбивки грунта на зоны

Исходные данные для выполнения расчета:

1. Размеры (габариты) теплицы: ширина $a = 7,45$ м ; длина $b = 8,40$ м ; высота (в верхней точке помещения) $h = 3,80$ м.

2. Расчетные параметры внутреннего воздуха (РД-АПК 1.10.09.01-14): температура $t_{вн.в} = 22$ °С ; относительная влажность $\phi_{вн.в} = 75$ %.

3. Параметры поверхности почвы (огурцы до плодоношения в зимне-весенний оборот, РД-АПК 1.10.09.01-14): температура $t_{пов} = 20$ °С ; коэффициент поглощения инфракрасного излучения $A = 75$ %.

4. Параметры ограждения: материал – сотовый поликарбонат; термическое сопротивление ограждения $R_{отр} = 0,25$ м² · К/Вт .

5. Расчетные параметры наружного воздуха для условий города Вологды (СП 131.13330.2018): температура $t_{н.в} = -32$ °С ; относительная влажность $\phi_{н.в} = 85$ %.

6. Параметры вентиляции: принудительная вентиляция с механическим пробуждением; кратность воздухообмена $n_v = 1,0$ м³/мин на 1 м² расчетной площади теплицы (минимальная кратность воздухообмена для индивидуальных теплиц круглогодичного использования).

7. Параметры орошения: коэффициент орошения поверхности почвы $k_{ор} = 1$ (орошается вся поверхность почвы в теплице).

8. Параметры газообразного топлива: природный газ; химический состав $CH_4 = 92,3$ % , $C_2H_6 = 0,7$ % , $C_3H_8 = 0,5$ % , $C_4H_{10} = 0,5$ % , $C_5H_{12} = 0,2$ % , $N_2 = 5,3$ % , $H_2O = 0,5$ % ; влагосо-

держание $d_{пр} = 10$ г/м³ ; плотность $\rho_t = 0,769$ кг/м³ ; низшая теплота сгорания $Q_n^p = 34,832$ МДж /м³ ; объем трехатомных газов в продуктах сгорания газообразного топлива $V_{RO_2} = 0,982$ м³/м³ .

9. Параметры газового инфракрасного излучателя: лучистый КПД $\eta_{луч} = 52$ % ; тепловой КПД $\eta_{изл} = 93$ %.

10. Параметры газового воздухонагревателя: тепловой КПД $\eta_{вп} = 91$ %.

Расчет комбинированной системы отопления промышленной теплицы «Фермер 7.5» (рис. 2) выполнен в математическом редакторе «Mathcad». Данный метод расчета основан на решении системы взаимосвязанных уравнений теплового и материального балансов помещения зимней теплицы, ее ограждения и поверхности почвы. К результатам решения относятся температура ограждения $t_{отр}$, °С, и приточного воздуха $t_{пр.в}$, °С, а также все тепловые и массовые потоки (приходные, расходные), представленные на рисунке 1.

На рисунке 3 показана зависимость расчетной тепловой мощности газового инфракрасного излучателя $Q_{изл}$, Вт, и газового воздухонагревателя $Q_{вп}$, Вт, от температуры наружного воздуха $t_{н.в}$, °С, за период отопительного сезона (для условий города Вологды). Дополнительной осью выступил расход углекислого газа V_{CO_2} , м³/ч, который потенциально может подаваться в зимнюю теплицу в случае утилизации продуктов сгорания природного газа.

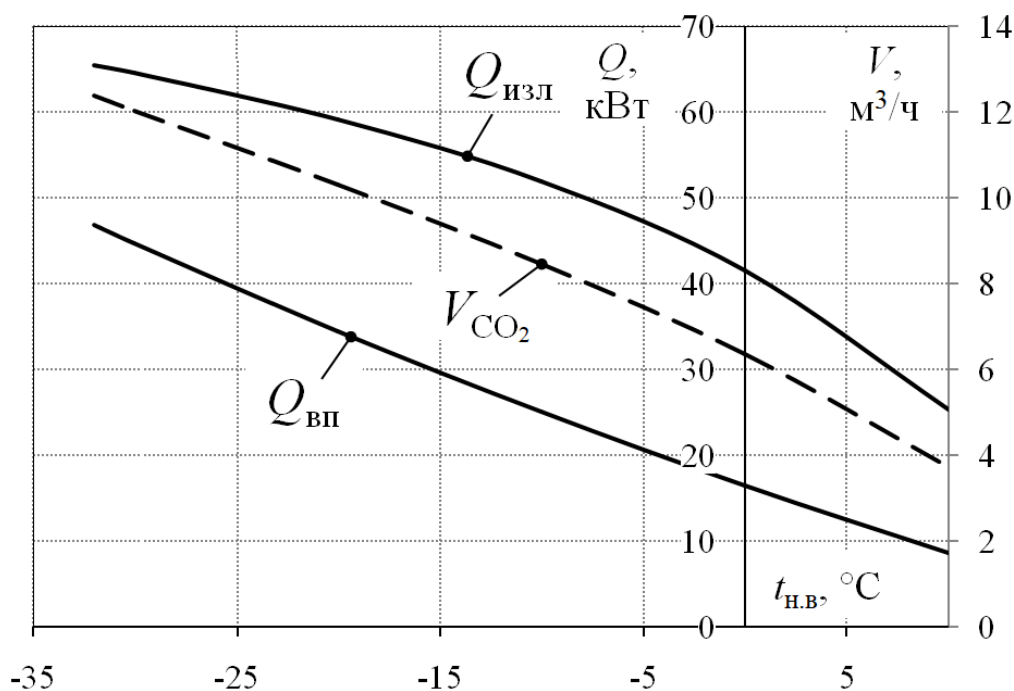


Рис. 3. Тепловая мощность комбинированной системы отопления зимней теплицы и подача углекислого газа (CO_2)

Согласно рисунку 3, с ростом температуры наружного воздуха $t_{н.в}$, °C, закономерно будут снижаться требуемая тепловая мощность газового инфракрасного излучателя $Q_{изл}$, Вт, и необходимый расход теплоты на нагрев приточного воздуха $Q_{вп}$, Вт, так как в соответствии с уравнением (1) тепловые потери через ограждение теплицы на нужды вентиляции и в грунт начнут уменьшаться. Снижение тепловой мощности комбинированной системы отопления зимней теплицы $Q_{общ}$ неизбежно приведет к уменьшению объема продуктов сгорания природного газа, а значит и к сокращению углекислого газа (CO_2), получаемого в единицу времени. В целом, корреляционная зависимость имеет вид:

$$V_{CO_2} = 0,11Q_{общ} - 0,025, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (2)$$

где $Q_{общ}$ имеет размерность [кВт].

Утилизация продуктов сгорания газообразного топлива в случае совместного применения двух различных газовых источников тепловой энергии для отопления зимней теплицы позволяет одновременно получать как дополнительную тепловую энергию, так и углекислый газ (CO_2). В первом случае это позволит уменьшить требуемую тепловую мощность газового инфракрасного излучателя и газового воздухонагревателя (расчеты показали, что теплота от продуктов сгорания газообразного топлива может составлять более 20 % суммарной тепловой мощности комбинированной системы отопления). Во втором случае – приток углекислого газа (CO_2) в качестве неотъемлемого химического соединения для осуществления фотоавтотрофной функции растений

окажет благоприятное влияние на их рост, развитие и плодоношение.

Литература

1. Баишева, Л. М. Микроклимат фермерской теплицы в условиях Крайнего Севера / Л. М. Баишева, Л. А. Львова // Перспективы науки. – 2019. – № 11 (122). – С. 22–25.
2. Мухачев, А. Д. Применение поликарбонатов в качестве энергоэффективной светопрозрачной конструкции / А. Д. Мухачев // Образование, наука, производство. – 2015. – С. 1326–1329.
3. Иванов, С. А. Использование модели Хольта для прогнозирования изменения температурного режима в закрытом грунте / С. А. Иванов, И. Ю. Квятковская // Вестник СГТУ. – 2016. – Т. 1. – № 1 (82). – С. 18–22.
4. Мазаев, Л. Р. Оптимизация режимов работы аккумуляторов тепла с разными материалами в солнечной теплице / Л. Р. Мазаев // Вестник ИрГСХА. – 2011. – № 46. – С. 92–98.
5. Кожухов, В. А. Разработка системы аккумулирования тепловой энергии в теплице с использованием тепловых насосов / В. А. Кожухов, А. Ф. Семенов // Вестник КрасГАУ. – 2008. – № 3. – С. 293–297.
6. Олейниченко, В. Г. Воздушная система отопления и кондиционирования теплиц с использованием геотермального источника энергии / В. Г. Олейниченко, В. В. Величко // Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – № 7 (111). – С. 84–87.
7. Узаков, Г. Н. Обоснование эффективности применения пиролизной установки для отопления теплиц / Г. Н. Узаков, Х. А. Давланов, Ю. Г. Узакова // Молодой ученый. – 2015. – № 19 (99). – С. 219–223.

M.V. Pavlov, D.F. Karpov
Vologda State University

WINTER GREENHOUSE COMBINED HEATING SYSTEM

The article considers the combined heating system of the winter greenhouse, which includes two different sources of thermal energy: an infrared emitter and an air heater. The first heat source forms the required thermal conditions of the soil while the second creates the necessary conditions of the winter greenhouse inside, determined by the internal air temperature. Gas heating equipment is of particular interest, as in this case it is possible to recycle heat from combustion products of gaseous fuel and to obtain carbon dioxide (CO₂) for the plants photosynthesis reaction.

Combined heating system; gas infrared emitter; gas air heater; soil; winter greenhouse.



Т.А. Поляков, Н.А. Полуэктова, О.А. Поварова
Череповецкий государственный университет

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ, ПОРАЖЕННОЙ ГРИБАМИ *SERPULA LACRYMANS*

В данной статье будут рассмотрены новые методы восстановления древесины, пораженной кониофоровыми грибами вида *Serpula lacrymans*, проведен сравнительный анализ результатов исследования образцов, восстановленных по предложенным технологиям, а также приведен обзор существующих на практике методов.

Биопоражения, восстановление древесины, ультрафиолет, *Serpula lacrymans*, исследование, СВЧ-излучение.

Деревянное зодчество – культурное наследие нашей страны. На сегодняшний день многие объекты находятся в аварийном состоянии и требуют реставрации. Зачастую древесина на таких объектах подвергается биопоражению – воздействию различных видов насекомых и грибов, наиболее опасным из которых является кониофоровый гриб *Serpula lacrymans* (Домовый гриб), способный разрушить до 50 % древесины в течение года. В процессе восстановления возникает необходимость борьбы с такими поражениями для сохранения исторического облика здания, так как многие элементы невозможно заменить полностью. Однако большинство из существующих на данный момент способов предполагают большие затраты на электроэнергию, долгий срок обработки или применение ядовитых веществ, вредных для человека. Возникает потребность разработки более эффективных, экономичных и экологических технологий восстановления древесины.

Существует множество методик восстановления биопоражений древесины, однако оценка воздействия ультрафиолета и СВЧ ранее не рассматривалась.

Целью данной работы является исследование возможности и анализ целесообразности применения технологии восстановления древесины, пораженной грибами вида *Serpula lacrymans*, путем воздействия УФ- и СВЧ-излучения.

На сегодняшний день для восстановления пораженной древесины проводят различные мероприятия, к примеру сушку и фитосанитарную обработку. Наша технология сочетает в себе все их преимущества. Рассмотрим другие варианты технологий, имеющие место на рынке.

1) *Фумигация* (от лат. fumigare – окуривать, дымить). Восстановление древесины происходит с помощью окуривания пиломатериалов, деревянных срубов домов фумигантом. Им служит химическое вещество, которое проникает в организм вредителей в виде газа, вызывая их гибель. К плюсам применения данной технологии можно отнести ее высокую эффективность, долговечность эффекта и относительную простоту воплощения. Однако главным минусом является сложность применения в связи с необходимостью полной изоляции материала на время действия и

разложения веществ фумигантов, что влечет за собой увеличение длительности процесса.

2) *Камерная сушка*. Этот метод является одним из самых распространенных видов обработки пиломатериалов, предназначенных для осуществления строительства различных объектов как бытового, так и промышленного назначения. Принцип работы таких камер основан на нагревании воздуха перегретым паром или горячей водой с последующим воздействием воздуха на пиломатериалы. По времени такая обработка длится несколько часов – конкретная продолжительность зависит от объема закладки и параметров материала. Плюсами такой технологии являются дешевизна (возможно использование в качестве топлива для калориферов отходы деревообработки (щепы, опилки)), простота применения. К минусам можно отнести необходимость полного демонтажа здания, подлежащего реконструкции, и подверженность древесины в течение процесса короблению.

3) *Народные средства*. Народных средств для борьбы с различными биопоражениями придумано много, и можно выбрать тот, который включает доступные человеку реактивы:

- водный раствор только медного купороса (100 г на 1 л горячей воды) или только железного купороса (150 г на 1 л горячей воды). Однако действие таких растворов по отдельности гораздо слабее;
- раствор фторида натрия (100 г на 1 л горячей воды);
- раствор, содержащий в 10 л воды 0,5 кг медного купороса и 1,5–2 л уксусной кислоты;
- раствор, содержащий в 10 л воды 0,9 кг буры, 0,4 кг борной кислоты и 1,4 л столового уксуса;
- препарат «Пентабос» (смесь пентахлорфенолята натрия, борной кислоты и кальцинированной соды).

Эти методы не отличаются своей эффективностью от товаров на рынке. Конечно, если речь идет о небольших областях поражения. Но к минусам таких способов можно отнести воздействие вредных химических веществ на человека и длительность процесса.

4) *Профессиональная обработка помещений*. В целом профессиональный подход использует те же принципы борьбы, но на более высоком качественном уровне. Так, первичная зачистка может производиться

шлифмашинами и ручными станками, обеспеченными абразивами достаточной зернистости. На этапах антисептического и биологического воздействия используются фунгицидные растворы, отличающиеся мощным химическим эффектом. Что касается финальной стадии, то домовый грибок со всеми спорами и следами окончательно устраняется СВЧ-оборудованием, которое прогревает поверхности микроволнами при температуре порядка 75 °С. Насколько оправдывает себя обращение к такой помощи? Профессиональная обработка выгодна и эффективностью в плане уничтожения грибка, и безопасностью для экологии самого помещения. Но стоимость такой услуги в среднем составляет 1,5–2 тыс. руб. за 1 м². Очевидно, что домашние средства обойдутся значительно дешевле.

5) *Химические средства*. Наиболее популярным средством устранения нежелательных процессов биологического развития в доме является пропитка из линейки «Неомид». Под этой маркой выпускаются специальные антигрибковые препараты, которые безопасны для людей, но эффективно устраняют вредоносные микроорганизмы. На ранних стадиях развития нежелательной флоры можно использовать состав «Неомид 430». Он подойдет для обработки внутри помещений. Если же подобные процессы происходят и снаружи, то применяется «Неомид 440». Для ликвидации домового грибка, который уже давно обосновался и продолжает активное развитие с охватом новых участков, стоит применить антисептическую пропитку «Биоцид-2». Это состав усиленного действия, который обеспечивает комплексное влияние на подобные микроорганизмы. Однако одним из главных минусов данного способа являются большие денежные затраты.

Анализируя рассмотренные методы, можно с уверенностью сказать, что предложенные нами технологии являются конкурентоспособными на рынке, так как сочетают в себе скорость, эффективность, экологичность и экономичность процесса.

Нами были исследованы две новые технологии по восстановлению древесины после воздействия биопоражений. Первая – облучение пораженной поверхности материала УФ, вторая – комбинированная обработка древесины воздействием СВЧ и УФ. Сочетание УФ- и СВЧ-обработки для восстановления древесных материалов ранее не рассматривалось. Перспективы применения СВЧ-излучения для борьбы с биопоражениями древесины уже известны. УФ-обработка древесины сегодня в качестве перспективной не рассматривается, нами предложено применение кратковременного облучения древесины для обработки ее от органических поражений и уничтожения спор в атмосфере помещения.

Основой первой разработанной технологии стал эффект поражения клеточных структур плесневых грибов при воздействии на них излучением с длиной волны 100–320 нм, приводящий к невозможности деления клеток и, следовательно, гибели тела гриба.

Основой второй технологии стала комбинированная обработка, сочетающая в себе особенности воздействия УФ и нагрев материала изнутри при воздействии на него СВЧ-поля, приводящий к гибели частей гриба, не доступных к обработке снаружи. Стоит отметить, что вид *Serpula lacrymans* не спосо-

бен выдерживать температуры выше 40–45 °С, а температура при обработке СВЧ достигает 70 °С.

Нами было решено исследовать эффективность предложенных методов путем сравнительного анализа испытаний образцов древесины без поражений, образцов, подвергшихся воздействию *Serpula lacrymans*, и образцов, восстановленных по предложенным технологиям. В критерии сравнения были включены прочностные свойства материала на сжатие вдоль и поперек волокон, вторичное появление поражений на поверхности восстановленных образцов, плотность материала.

В качестве древесины для испытания была выбрана сосна как наиболее распространенная порода древесины среди объектов деревянного зодчества. К сравнению были приняты стандартные образцы в виде прямоугольной призмы сечением 20 × 20 мм и высотой вдоль волокон 30 мм. Предварительно древесина подвергалась воздействию кониофорового гриба *Serpula lacrymans* в оптимальных для него условиях (t=18–21 °С, высокая влажность, замкнутая атмосфера) в течение 21 дня, до появления тела гриба на поверхности материала. Далее проводилось восстановление 2 групп образцов по предложенным методам.

1. УФ-обработка поверхности материала производилась путем облучения поверхности древесины ртутной газоразрядной лампой с колбой из кварцевого стекла, с длиной волны 100–320 нм, при расстоянии до поверхности древесины 10 см в течение 30 минут для каждой стороны образца. Затем проводилось механическое отделение отмершего тела гриба с поверхности.

2. Комбинированная обработка. СВЧ-обработка образцов проводилась после обработки УФ по схеме, предложенной в 1 пункте, до достижения нормативной влажности по ГОСТ 8242-88, равной 12±3 %, в течение 15 минут, с перерывами для охлаждения материала через каждые 5 минут (исходная плотность – 1116,7 кг/м³ (переувлажненный образец)).

После восстановления образцов нами были проведены испытания на прочность и осмотр образцов на наличие повторных органических поражений через 14 суток. Результаты исследований образцов представлены в таблице.

Подводя итоги исследования, хотелось бы отметить огромный потенциал подобных методик восстановления древесины. Помимо уничтожения биопоражения нам также удалось достичь улучшения прочностных свойств пораженного материала. Как можно понять из результатов испытаний образцов, прочность восстановленных после поражения по комбинированной технологии образцов почти вернулась на уровень до поражения. Этот эффект можно объяснить тем, что образцы под воздействием СВЧ высохли, структура упрочнялась благодаря гибели внутренних поражений. Стоит отметить положительный эффект УФ методики. Образцы, прошедшие восстановление по 1 методу, хотя и не увеличили свои прочностные характеристики, но не подверглись повторному поражению грибами в течение 10 дней после обработки, что говорит о высокой эффективности такой обработки в комплексе с химическими методами, обеспечивающими глубокое проникновение в материал.

Результаты испытаний образцов сосны на сжатие, а также повторное появление поражений

Название образца	Прочность на сжатие вдоль волокон, МПа	Прочность на сжатие поперек волокон, МПа	Наличие органических поражений	Плотность, кг/м ³
Сосна без поражений	31	4,3	-	573,3
Сосна, пораженная <i>Serpula</i>	12	2,2	+	1116,7
Сосна, восстановленная УФ	16,2	2,4	+	666,7
Сосна, восстановленная комбинированным методом	25,3	3,6	-	512,8

Результаты испытаний говорят сами за себя – нам удалось разработать и доказать эффективность применения двух видов борьбы с поражением древесины грибами вида *Serpula lacrymans*.

Данная технология может найти применение в реставрационных работах, а также реконструкции деревянных зданий для восстановления элементов, полная замена которых невозможна.

В ходе исследований нам удалось разработать две технологии восстановления древесины, пораженной кониофоровыми грибами вида *Serpula lacrymans* путем облучения материала СВЧ и УФ. Применение таких технологий улучшает прочностные качества пораженной древесины сосны, сокращает время обработки, почти полностью исключает повторное поражение поверхности материала.

Хотелось бы отметить новизну разработанных технологий – ранее чистое воздействие УФ и комбинированная обработка СВЧ и УФ для восстановления биопораженной древесины не рассматривались.

Литература

1. ГОСТ 16483.0-89 (СТ СЭВ 6470-88). Древесина. Общие требования к физико-механическим испытаниям : государственный стандарт Союза ССР : введен 1989-07-19. – Текст : электронный // Техэксперт : информационно-справочная система / Консорциум «Кодекс» (дата обращения: 17.11.2020). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

2. Международные стандарты по фитосанитарным мерам МСФМ № 15, номер регистрации: 3389/ISPM Дата регистрации: 30.04.2008.

3. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 (с Изменениями N 1, 2) : введен 28-08-2017. – Текст : электронный // Техэксперт : информационно-справочная система / Консорциум «Кодекс» (дата обращения: 17.11.2020). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

T.A. Polyakov, N.A. Poluektova, O.A. Povarova
Cherapovets State University

DEVELOPMENT OF RESTORING METHODS OF WOOD DAMAGED BY FUNGI

This article discusses new methods for restoring wood affected by conioflore fungus *Serpula lacrymans*, conducts a comparative analysis of the results of the study of samples restored by proposed technologies, and provide an overview of existing methods in practice.

Biological lesions, wood restoration, ultraviolet, *Serpula lacrymans*, research, microwave radiation.



**В.И. Римшин², Е.С. Кецо¹,
П.С. Трунтов², И.С. Кузина²,
Г.С. Быков¹**

¹ Научно-исследовательский институт
строительной физики,

²Московский государственный
строительный университет

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА УСИЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЯ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В статье приведены расчеты усиления строительных конструкций 2-х этажного корпуса бизнес-центра методом конечных элементов с созданием пространственной модели здания. Выполнены расчеты усиления плиты над колоннами, опорных участков балок перекрытия, металлических балок перекрытия и колонн по оси 2/И-Р и прогонов покрытия, переопирания бронестены на плиту и стену, устройства разгрузки ребристых плит и сборных ригелей, устройства конструкций стяжки пола 2-го этажа. Также плита и стяжка пола рассчитаны на нагрузки при дополнительных исходных данных. Расчеты моделей здания и его фрагментов реализованы с применением лицензированного программного комплекса программы ЛИРА 9.6 R9. Работа колонн моделировалась соответствующими стержневыми элементами. Работа металлических конструкций рамы моделировалась трех- и четырехузловыми пластинчатыми элементами. Работа металлопрокатных балок – стержневыми элементами. Плиты перекрытий представлены четырехузловыми пластинчатыми элементами.

Метод конечных элементов, усиление строительных конструкций, пространственные конструкции, стержневые и пластинчатые элементы.

Расчет усиления строительных конструкций 2-х этажного корпуса бизнес-центра выполнен на основании результатов детально-инструментального обследования конструкций здания, осмотра и обследования конструкций, материалов и свойств грунтового основания. Общая конструктивная схема здания принята жесткой. Фундамент на естественном основании, с характеристиками, полученными в результате обследования. Все основные несущие конструкции запроектированы из монолитного железобетона и металлических рам. Пространственная жесткость и устойчивость здания обеспечивается совместной работой несущих рамных конструкций, объединенных связями и монолитным диском перекрытия. Расчет произведен в

соответствии с требованиями основных нормативных документов и сводами правил.

Статический расчет конструкций здания выполнен методом конечных элементов с созданием пространственной модели здания. Расчеты моделей здания и его фрагментов реализованы с применением лицензированного программного комплекса программы ЛИРА 9.6 R9. Конечно-элементная модель 2-х этажного корпуса содержит: 30 775 узлов и 32 395 элементов. При выполнении расчетов конечно-элементная модель рассматривалась как упругая [1].

Типы загружений.

Собственный вес конструкций. Сбор нагрузок представлен в таблице 1.

Таблица 1

Сбор нагрузок

Материал	Формула подсчета/ нормативная нагрузка/кг	K _n по на- грузке	Расчетная нагрузка/кг	
			Суммар- ная	Суммарная расчетная на пролет
<i>Конструкция подвесного потолка</i>				
лист брони 6.3 мм	$0,0063 \cdot 7850 = 49.45$	1.05	51.92	
лист стали 3 мм	$0.003 \cdot 7850 = 23.55$	1.05	24.7	
лист резины 10 мм	$0.01 \cdot 1500 = 15$	1.1	16.5	
гнутой швеллер 210x57x4 мм	15.72		15.72	
звукоизоляция 200 мм	$0,2 \cdot 45 = 9$	1.2	10,8 кг/м ²	
итого:	112.72		119.64	861.4
<i>* при расчете подвеса $12,5 \cdot 4,2 \cdot 1,05 = 55.1$ кг вес уголка 100x8</i>				
<i>Нагрузка от кровельного пирога</i>				
защитная ПВХ-мембрана	1.4	1.2	1.68	
геотекстиль	1		1	
пенopleкс 35	5,2	1.2	6,25	
минераловатные плиты РУФ БАТТС	5,75	1.2	6.9	
Профилированный настил Н114	15,6	1.1	17.16	
итого:	28.95		33	198
<i>*вес прогонов учтен в ПК</i>				

Материал	Формула подсчета/ нормативная нагрузка/ кг	К _н по нагрузке	Расчетная нагрузка/кг	
			Суммарная	Суммарная расчетная на пролет
<i>Нагрузка на плиту после усиления полов</i>				
керамзит 250 мм	$0.25 \cdot 800 = 200$	1,3		260
цементно-песчаная стяжка 100 мм	$0.10 \cdot 1800 = 180$	1.2		216
лист брони 6.3 мм	$0.0063 \cdot 7850 = 49.45$	1.05		51.92
грунтовка П-01	1.5			1.5
резиновая плитка	48.06			48.06
смесь резиновая крошка (2–3мм)+ клей Стандарт П-02	24.76			24.76
окраска «Компаунд»	5			5
итого:	459.32			607

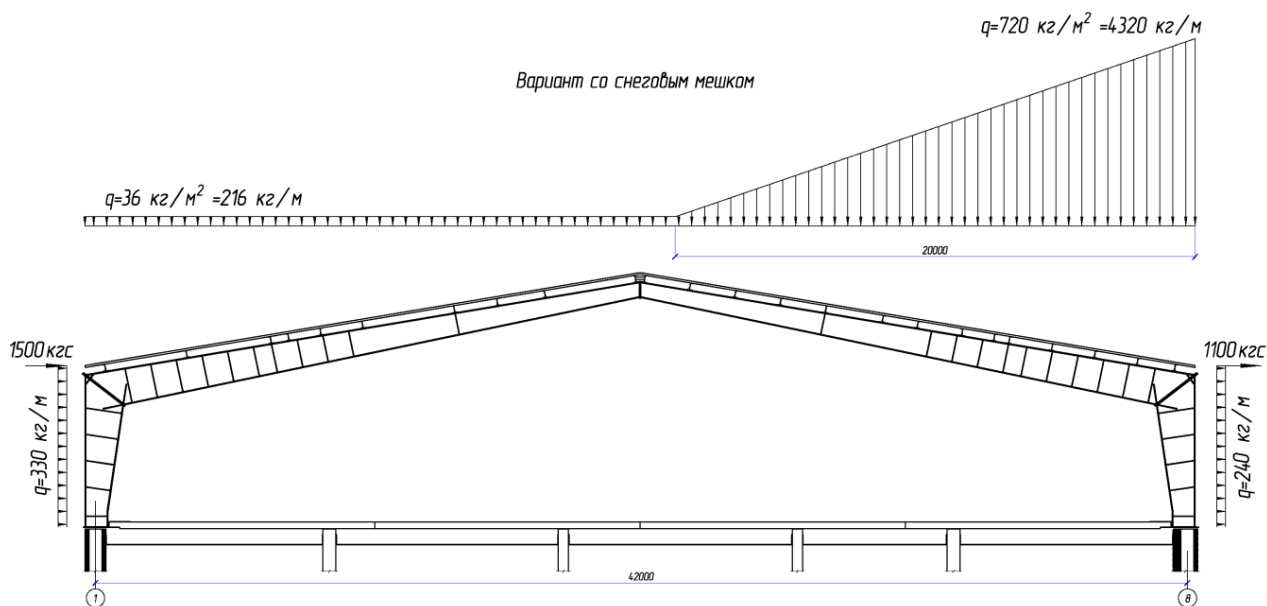


Рис. 1. Снеговая и ветровая нагрузка со снеговым мешком

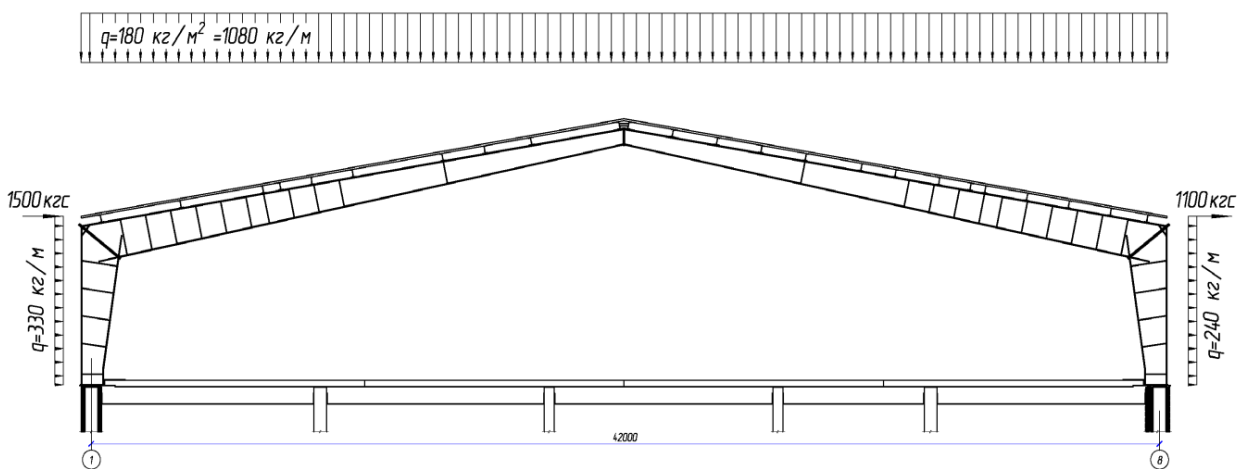


Рис. 2. Снеговая и ветровая нагрузка без снегового мешка

Расчетная нагрузка на 1 пог. м рамы от подвесного оборудования и мостков – 136.8 кг, нагрузка от конструкций стен из бронелистов принята как от подвесного потолка высотой 4 м, нагрузка от конструкций пулеуловителей принята по спецификациям раздела технической оснащённости с коэффициентом запаса 1.1 (320 кг/м²).

Временная нагрузка. Учет нагрузки от маневрирующих автомобилей весом 2100 кг и 3300 кг: 2100 кг – 500кг/м²·1.2=600 кг/м², 3300 кг – 700кг/м²·1.2=840 кг/м².

При расчете на продавливание добавляем вес машины $\frac{Q_i}{2} = \frac{2100 \cdot 1.2}{2} = 1260 \text{ кг/м}^2$ в серединах пролета на участке 100 мм·100 мм с удаленностью друг от друга на 1.8 м (рис. 3). Принимается нагрузка 840 кг/м², в которой уже присутствует временная нагрузка от людей. Суммарная расчетная нагрузка на плиту от веса полов и временной нагрузки – 1447 кг.

Снеговая нагрузка. Расчетный вес снегового покрова для III района 180 кг/м² с учетом снегового мешка в месте примыкания к кровле офисного здания на участке до 20 м увеличивается до 720 кг/м² (рис. 1 и 2). При расчете пола учитывались нагрузки, представленные на рисунке 3.

Для правильной работы узла стыковки колонны и плиты в местах опирания (рис. 4) применена схема усиления, представленная на рисунке 5. На основании произведенного расчета принимаем армирование по верхнему слою [2].

Суммарное армирование выполнено из арматурных стержней диаметром 20 мм и существующей 12 мм – $31,42 \text{ см}^2 + 5,655 \text{ см}^2 = 37,075 \text{ см}^2 > 34,50 \text{ см}^2$ (требуемая площадь армирования вдоль буквенных осей). Коэффициент использования составляет 93 %.

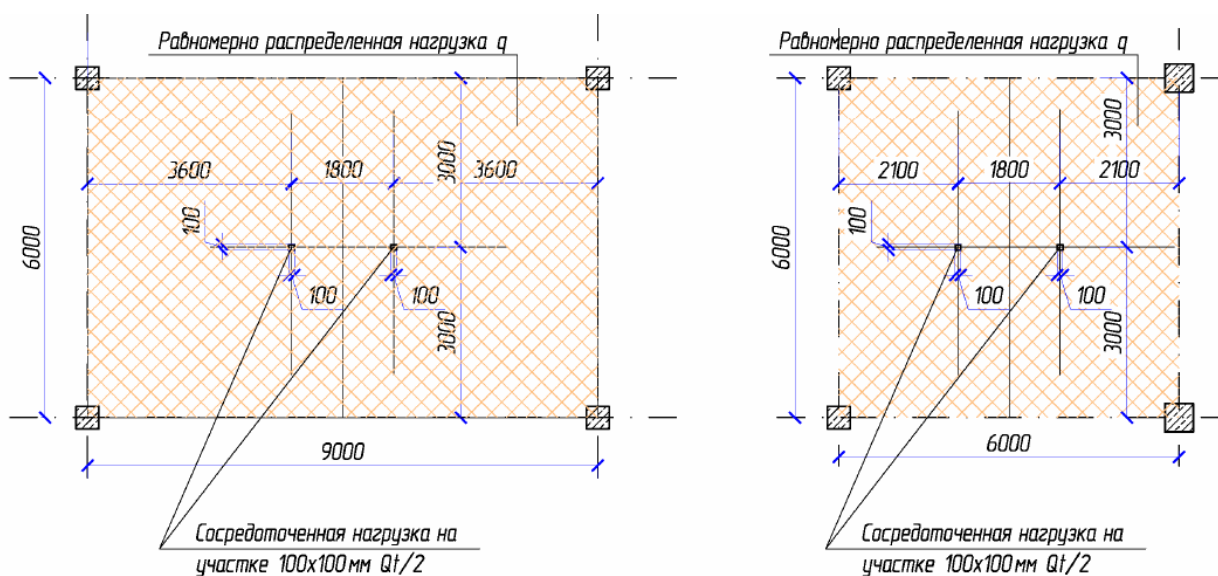


Рис. 3. Приложения нагрузки от автомобилей в различных пролетах при расчете на продавливание

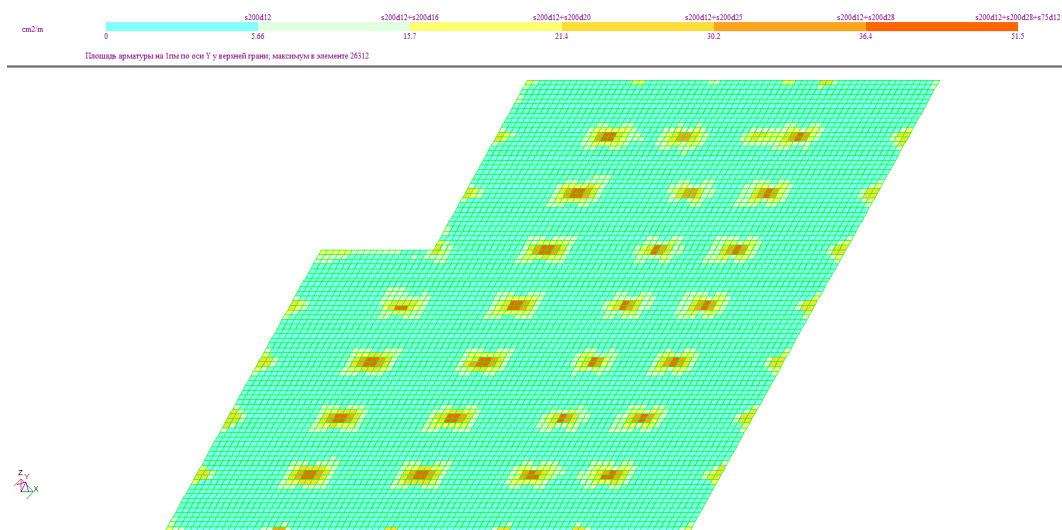


Рис. 4. Площадь арматуры по оси X₁ верхней грани. Приведенная арматура

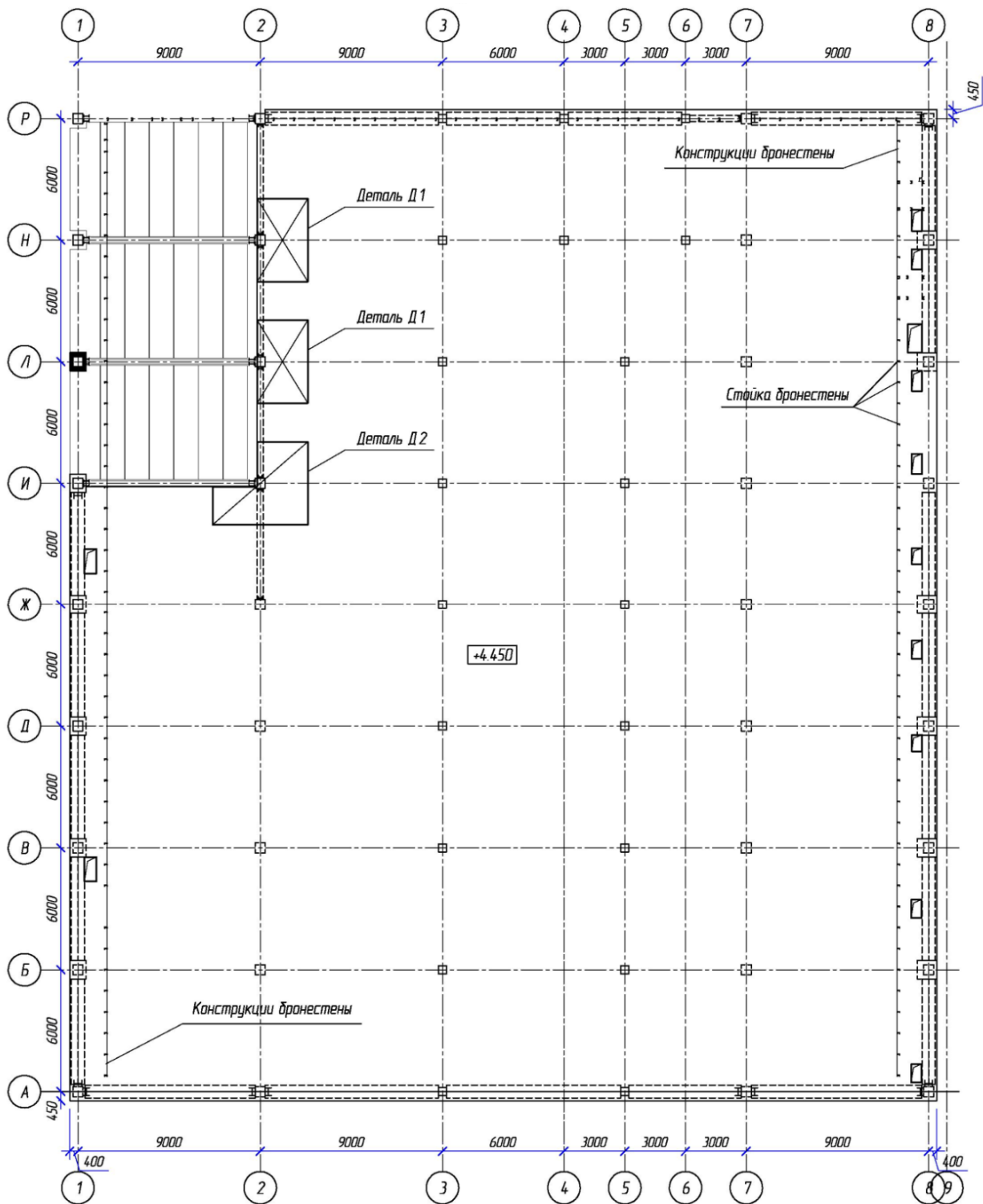


Рис. 5. Схема усиления опорных участков плиты

Деталь переопирания плиты на стену представлена на рисунке 6.

495,3 кг – вес конструкций бронестены. Расчетное усилие шва – 495,3 кг (4,95 кН). Определяем требуемую длину шва крепления:

$$l = \frac{4,95}{2 \cdot 0,7 \cdot 0,6 \cdot 15 \cdot 1 \cdot 1} = 0,393 + 2,617 = 3 \text{ см}$$

(катет шва 6 мм) < 10 см.

Прочность крепления сварных швов переопирания бронестены обеспечена.

Для усиления данного участка принимаем схему разгрузки конструкций ребристых плит и ригелей, представленную на рисунке 7. В таблице 2 приведены предельные нагрузки при различных видах расчетных схем.

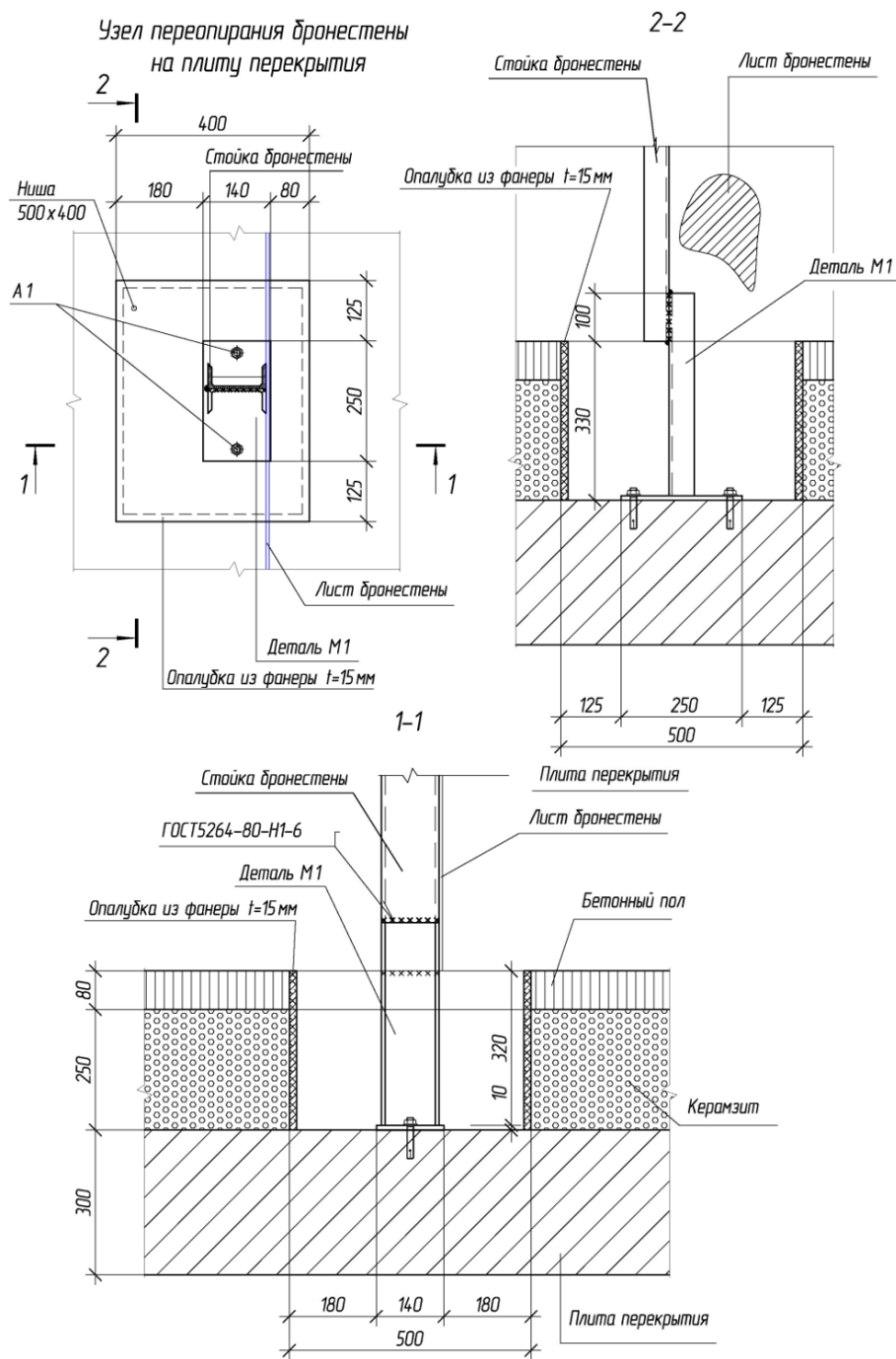


Рис. 6. Деталь переопирания плиты на стену

Таблица 2

Значения предельных нагрузок

Марка профнастила	Шаг опор, м	Предельная нагрузка, кг/м ² , при расчетной схеме			
		Схема 1, с одним пролетом 	Схема 2, с двумя пролетами 	Схема 3, с тремя пролетами 	Схема 4, с четырьмя пролетами 
Н158-750-1,5	5,0	852	827	1005	Нет данных
	6,0	482	602	736	
	9,0	126	285	265	

Предусмотрено расположение профлиста в пространстве широкой полкой вниз. Рассчитываем перекрытие по профнастилу как тавровую балку шириной 250 мм. Сечение профиля выбираем для удобства монтажа и возможных малых деформациях при монтаже и возможном прогибе. Профлист располагаем широкой полкой вниз, так как при обратном расположении арматура не будет должным образом находиться в теле бетона [3].

По результатам расчета принимаем, что нижняя арматура имеет диаметр 32 мм, верхняя арматура – 18 мм. Производим подбор балки по оси 1 (рис. 8). Конструкция балки по оси 1 БМ1 принята из условий несущей способности по 2-м группам предельных состояний и по условиям опирания монолитной плиты перекрытия по профнастилу.

Расчет конструкций стяжки пола 2-го этажа. Для правильной передачи нагрузки на пол и вывешивания конструкции пола в пространстве принимаем модуль упругости керамзита $90\ 000\ \text{кг/см}^2$, что фактически является средним из минимальных значений. Сам керамзит моделируем стержнями. Также из нагрузки на пол убираем вес керамзита и вес монолитного пола. Их веса учитываются программным комплексом. Бетон класса В20. Как вариант 2 просчитываем пол по керамзиту как на естественном основании, принимая коэффициенты постели от 1500 до 5000 т/м^3 . В обоих случаях армирование карты – не превышает выбранного армирования. Эпюры моментов изображены на рисунках 9 и 10.

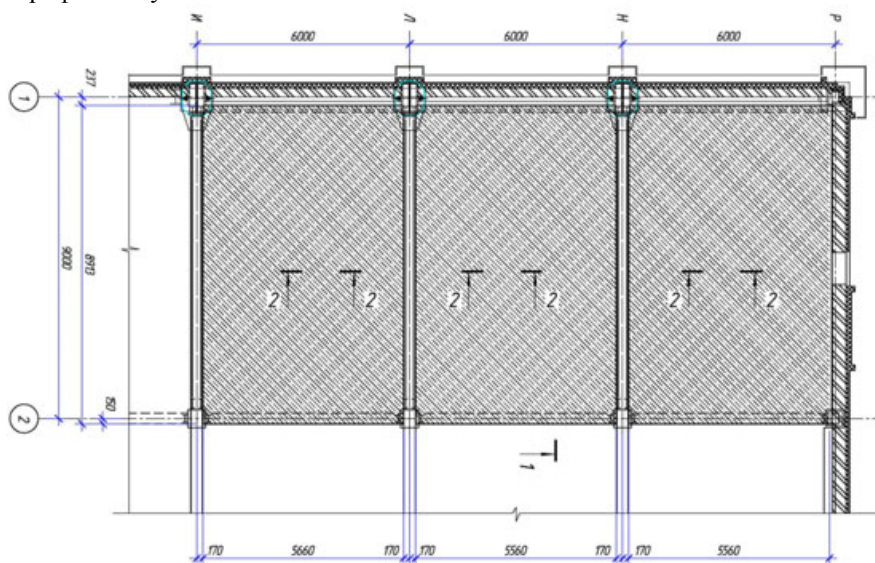


Рис. 7. Схема разгрузки устройством плиты по профлисту

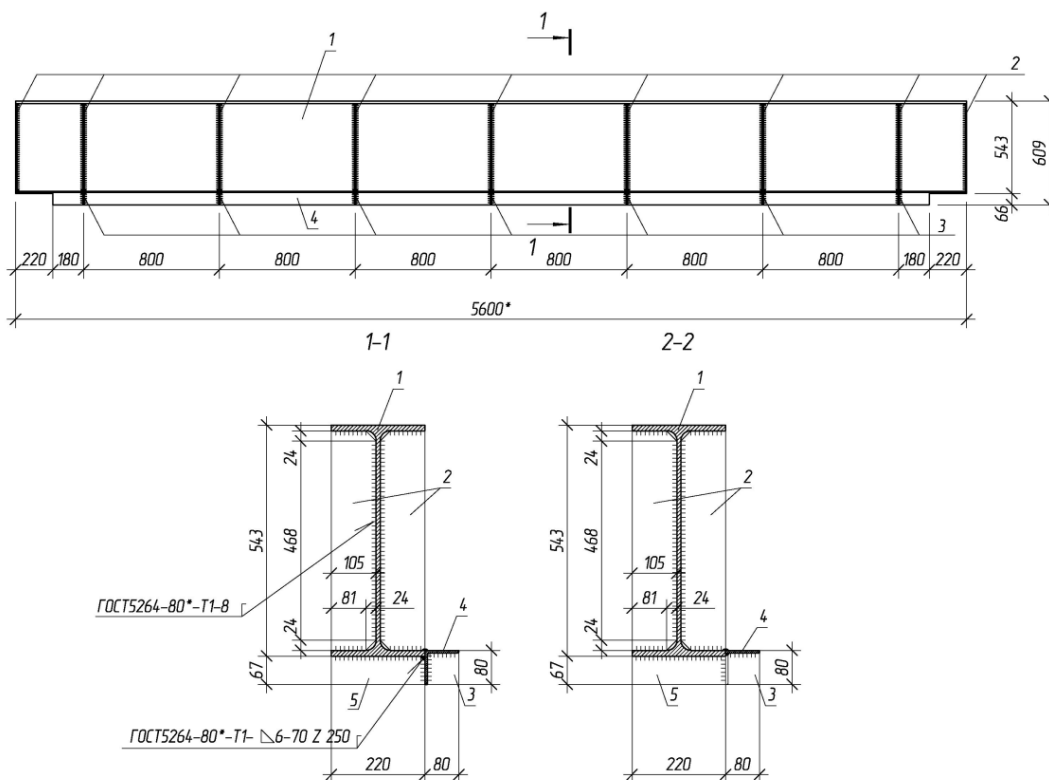


Рис. 8. Балка по оси 1

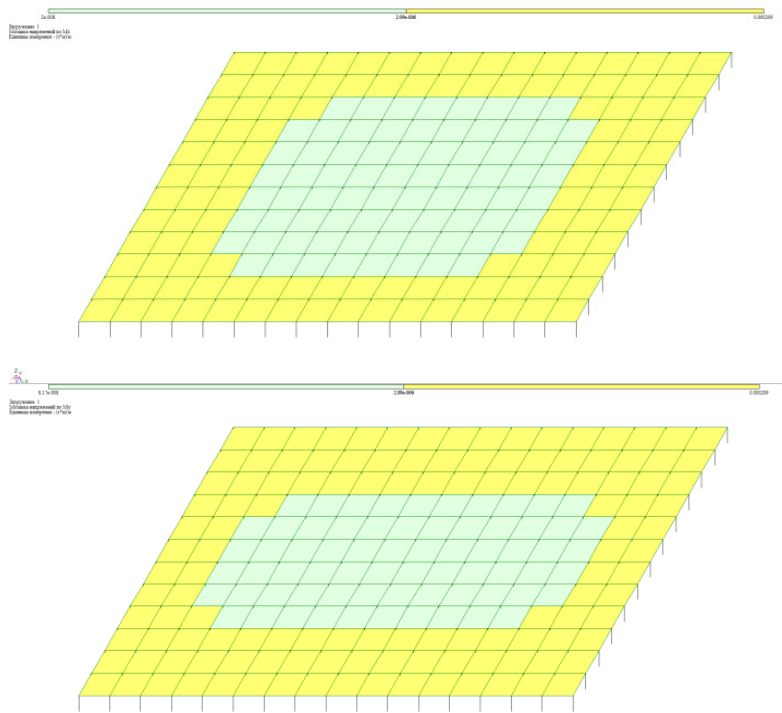


Рис. 9, 10. Эпюры моментов M_x и моментов M_y соответственно

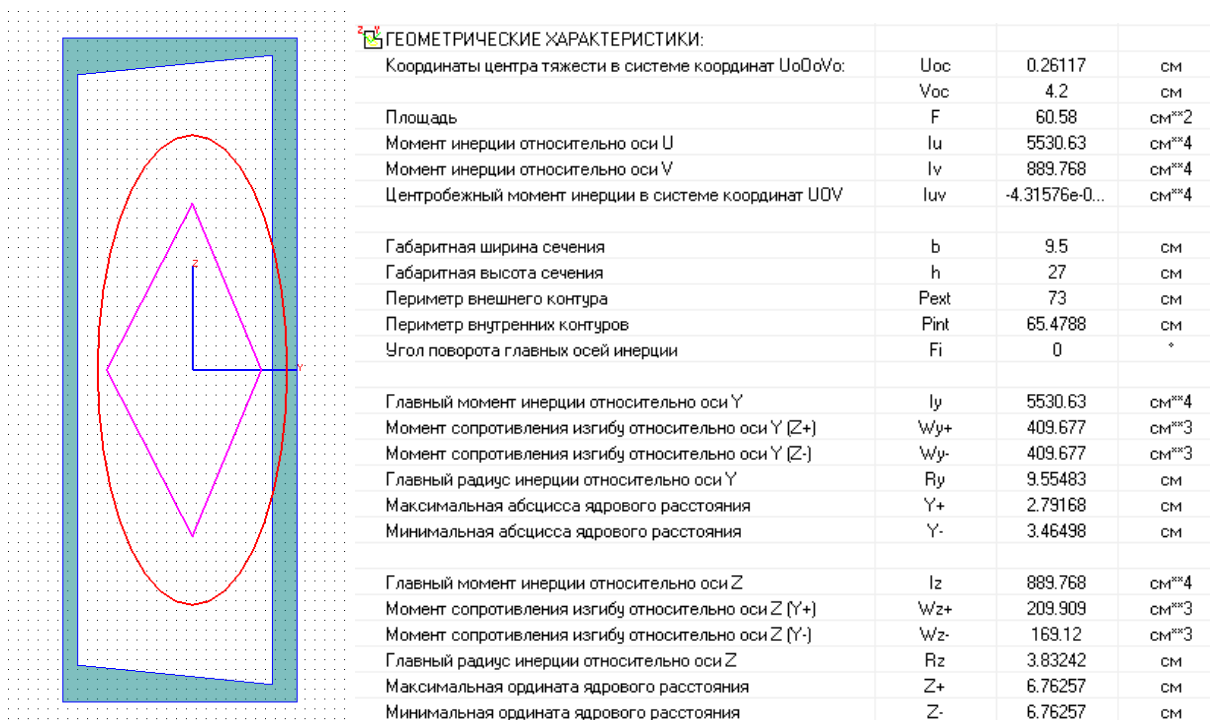


Рис. 11. Характеристики усиленного сечения прогонов

Характеристики усиленного сечения прогонов представлены на рисунке 11.

Максимальный пролет балки составляет $L=6$ м. Шаг балок покрытия составляет 1,67 м. Считаем балку на воздействие снегового мешка на расстоянии 1895 мм от края рамы в самом нагруженном месте. Нагрузка в данном случае составляет 655 кг/м^2 с учетом снегового мешка. 33 кг/м^2 – вес кровельного пирога. Грузовая площадь:

$$S = 6 \cdot 1.67 = 10.02 \text{ м}^2,$$

$$q = (655 + 33) \cdot 1.67 + 47.3 = 1196.26 \text{ кг/м}.$$

Швеллер № 27У с усилением пластиной с $W_x=409 \text{ см}^3$ $W_y=209 \text{ см}^3$. Расчетный изгибающий момент и поперечная сила:

$$M_{\max} = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{11.96 \cdot 6^2}{8} = 53.82 \text{ кН/м},$$

$$Q_{\max} = \frac{q \cdot l}{2} = \frac{11.96 \cdot 6}{2} = 35.88 \text{ кН}.$$

Уклон кровли составляет 10 градусов. Проверим балку на изгиб в двух плоскостях:

$$M_x = 53.82 \cdot \cos 80 = 9.34 \text{ кН} / \text{м},$$

$$M_y = 53.82 \cdot \cos 10 = 53.00 \text{ кН} / \text{м},$$

$$\frac{934}{209} + \frac{5300}{409} = 17.42 \text{ кН} / \text{см}^2 < 24 \cdot 0.9 = 21.6 \text{ кН} / \text{см}^2,$$

$$\frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} = R_y \gamma_c,$$

где R_y – расчетное сопротивление стали по пределу текучести. Коэффициент использования составляет 81 %.

Схема усиления опорных участков балок перекрытия приведена на рисунке 12. Проверим прочность шва крепления уголков обвязки колонны к уголкам обвязки оголовка по формуле:

$$\sigma_w = \frac{N_{cm}}{I_w \cdot K_f} = \frac{2460}{24 \cdot 0.6} = 170.8 < 174.8 \text{ МПа}.$$

Проверяем прочность шва крепления уголков обвязки колонны к уголкам за вычетом анкерного крепления $65,7 \cdot 4 = 262,8 \text{ кН}$ обвязки оголовка по формуле:

$$\sigma_w = \frac{N_{cm}}{I_w \cdot K_f} = \frac{2197,2}{24 \cdot 0.6} = 152.6 < 174.8 \text{ МПа}.$$

Коэффициент использования составляет 87,2 %.

С учетом усиления конструкций перекрытия и нехватки несущей способности по результатам обследования доводим сечения балок колонн и перекрытий до требуемых значений с учетом конструктивных особенностей. На рисунке 13 представлена схема усиления колонн и балок. На рисунках 14 и 15 приведены геометрические характеристики усиленной балки и колонн по оси 2/И-Р [4].

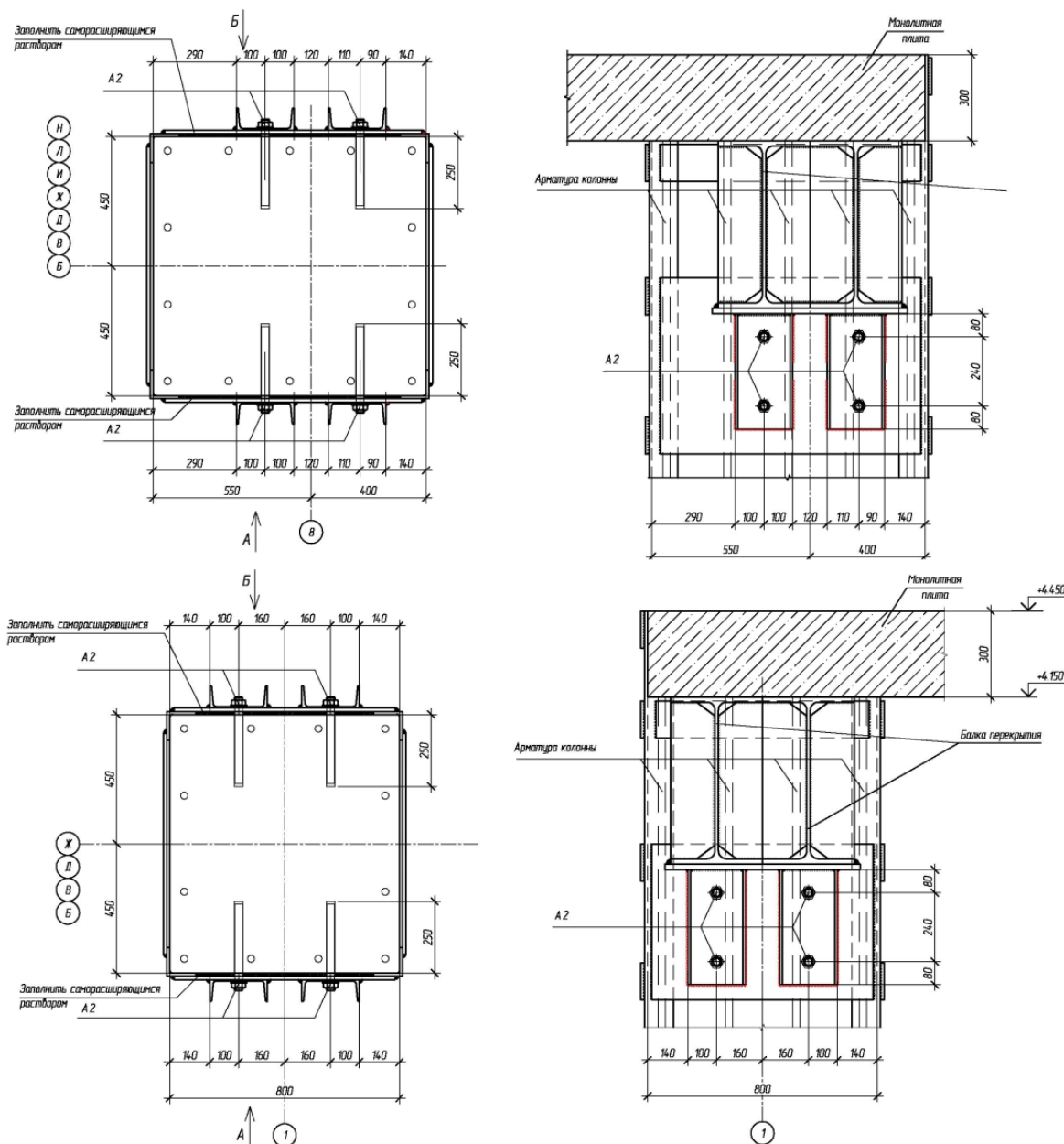


Рис. 12. Схема усиления опорных участков

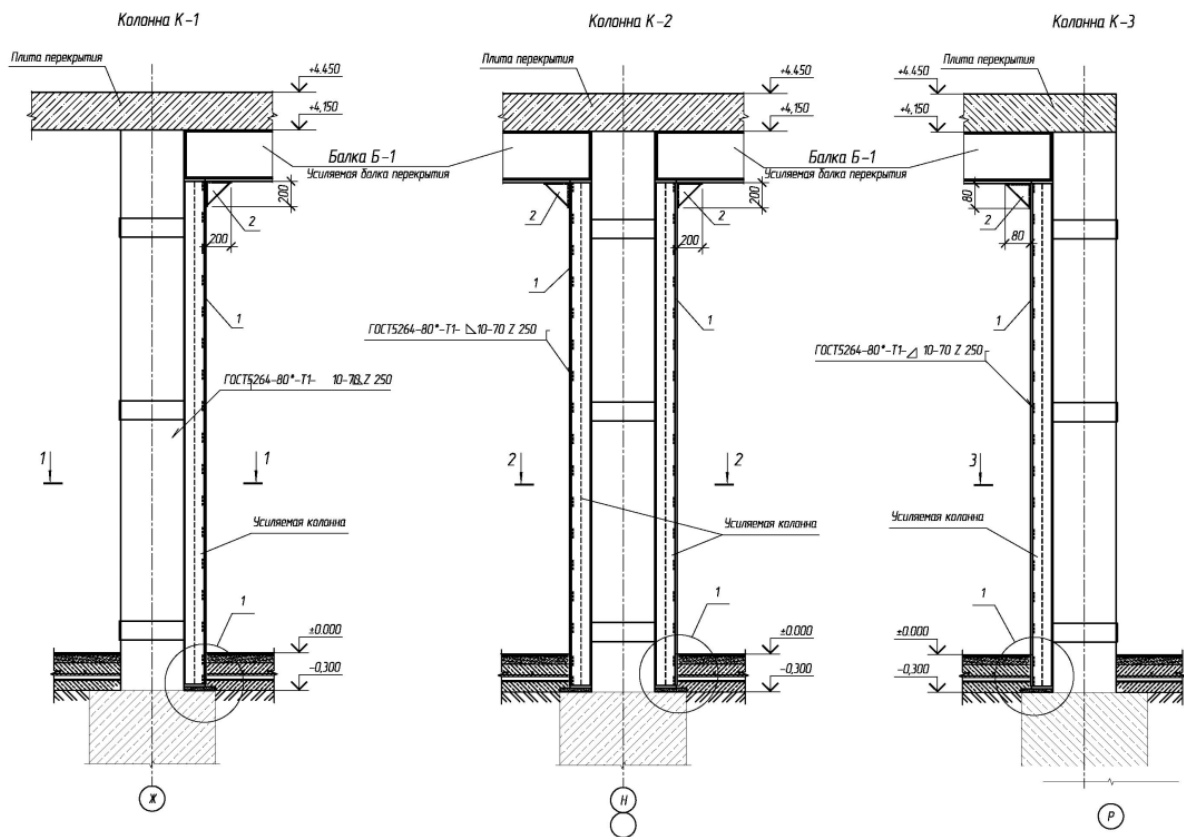
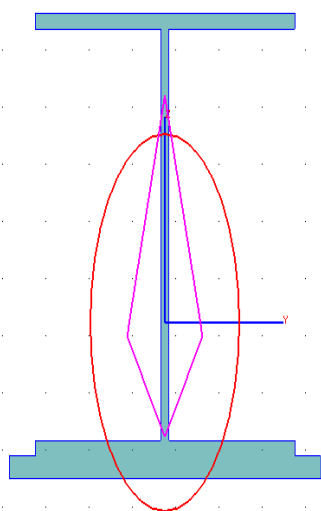


Рис. 13. Схемы усиления колонн и балок



ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:			
Координаты центра тяжести в системе координат $U_0O_0V_0$:	U_{oc}	13.8	см
	V_{oc}	11.0998	см
Площадь	F	189.9	см ²
Момент инерции относительно оси U	I_u	51667	см ⁴
Момент инерции относительно оси V	I_v	14056.1	см ⁴
Центробежный момент инерции в системе координат UOV	I_{uv}	-0.000140625	см ⁴
Габаритная ширина сечения	b	36	см
Габаритная высота сечения	h	40.79	см
Периметр внешнего контура	P_{ext}	211.68	см
Периметр внутренних контуров	P_{int}	0	см
Угол поворота главных осей инерции	F_i	0	°
Главный момент инерции относительно оси Y	I_y	51667	см ⁴
Момент сопротивления изгибу относительно оси Y (Z^+)	W_{y+}	1906.52	см ³
Момент сопротивления изгибу относительно оси Y (Z^-)	W_{y-}	3774.11	см ³
Главный радиус инерции относительно оси Y	R_y	16.4947	см
Максимальная абсцисса ядрового расстояния	Y^+	4.11213	см
Минимальная абсцисса ядрового расстояния	Y^-	4.11213	см
Главный момент инерции относительно оси Z	I_z	14056.1	см ⁴
Момент сопротивления изгибу относительно оси Z (Y^+)	W_{z+}	780.893	см ³
Момент сопротивления изгибу относительно оси Z (Y^-)	W_{z-}	780.893	см ³
Главный радиус инерции относительно оси Z	R_z	8.60339	см
Максимальная ордината ядрового расстояния	Z^+	19.8742	см
Минимальная ордината ядрового расстояния	Z^-	10.0396	см

Рис. 14. Геометрические характеристики усиленной балки

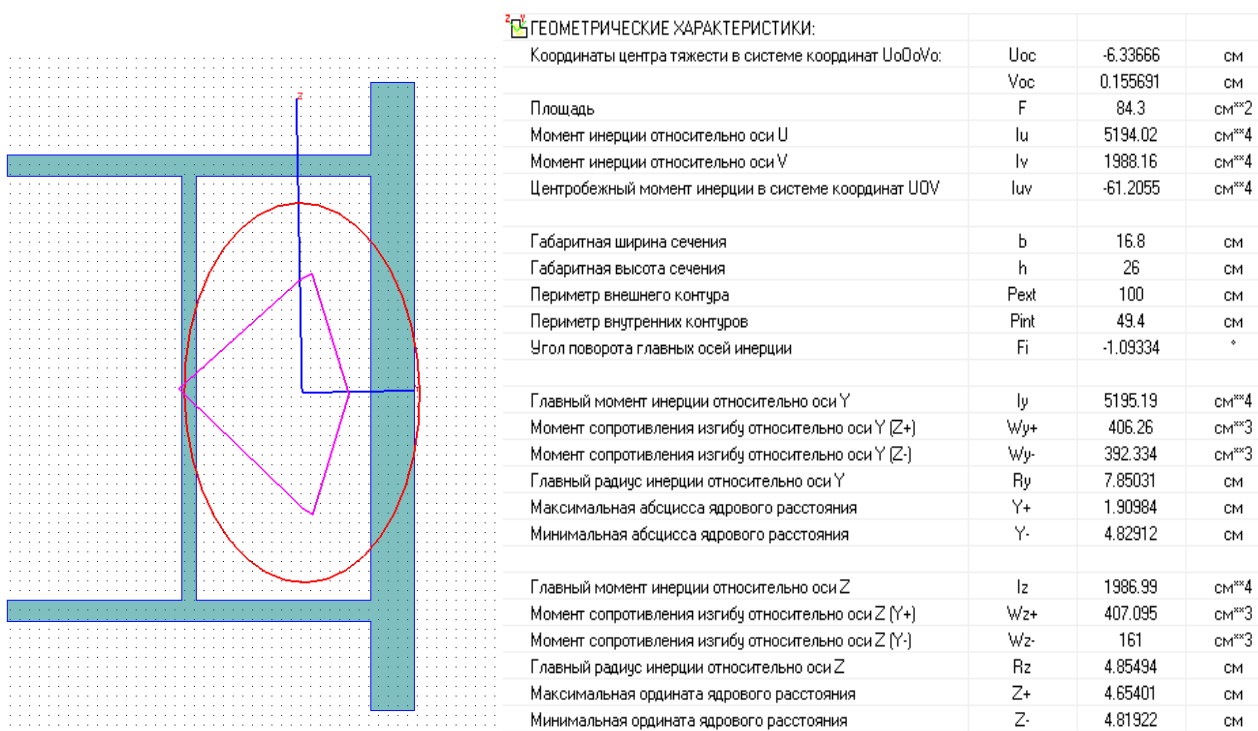


Рис. 15. Геометрические характеристики усиленной колонны

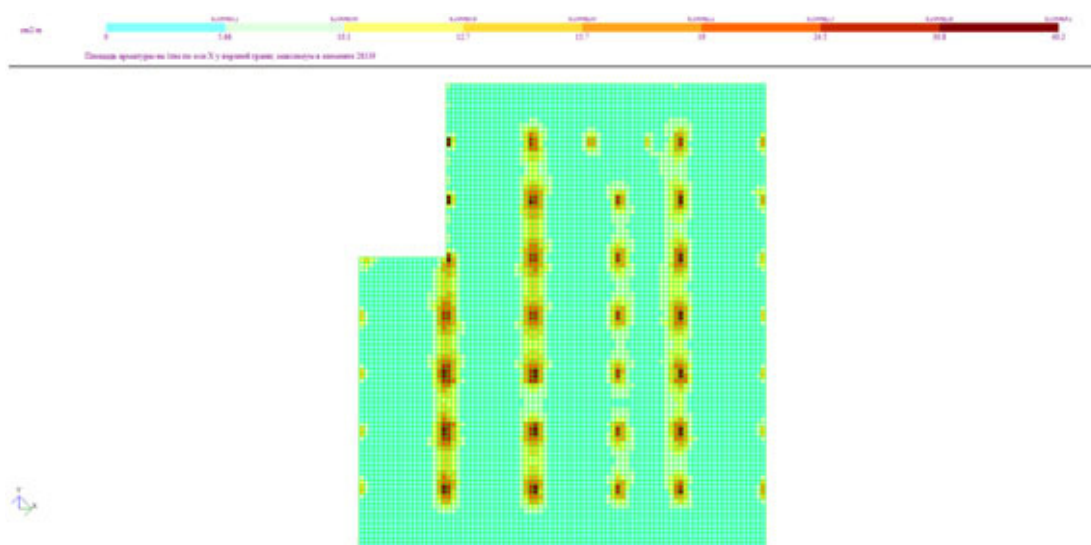


Рис. 16. Арматура по оси X_y верхней грани сечения

Металлическая колонна и металлическая балка после усиления имеют значения характеристик, влияющих на действие моментов, поперечных и продольных сил большие, чем при подборе, сделанном в отчете. Коэффициент использования после усиления при расчете по 2-м группам предельных состояний для колонны и ригеля составляет 83–90 %.

На рисунке 16 приведена схема армирования по оси X у верхней грани сечения.

При расчете нагрузка на плиту принималась согласно новым исходным данным. Для расчета плиты перекрытия принималась расчетная нагрузка от автомобиля в качестве распределенной нагрузки 840 кг/м² в габаритных размерах автомобиля 2.5x5.5 метров. Предусмотрено, что маневрирование автомобиля с

пассажирами в помещении тира происходит в осях А-Н/1-8 (где местами в серединах пролета прикладывалась нагрузка 840 кг/м² и временную технологическую расчетную нагрузку 130 кг/м²). Одновременное нахождение людей в зоне осей Н-Р/1-8 загрузалось расчетной нагрузкой 400 кг/м². В технологическом пространстве между бронестеной и наружными стенами принималась эксплуатационная расчетная нагрузка 200 кг/м², как для служебных помещений. Нагрузка от конструкции полов принята в соответствии с фактическим весом материалов после усиления. Проверяем верхнее армирование. Суммарное армирование из стержней диаметром 20 мм, которые использовались для обрамления отверстий, составит

$$12,57 \text{ см}^2 + 5,655 \text{ см}^2 = 18,225 \text{ см}^2 > 15.49 \text{ см}^2.$$

Коэффициент использования составляет 84 %.

При расчете армирования пола принималась нагрузка в виде четырех площадок размером 0.28x0.28 м. Центры площадок расположены в форме прямоугольника со сторонами 1.65x2.85 м. Нагрузка на каждую из площадок принималась $900 \cdot 1,2 = 1080 \text{ кг}$.

Конечно-элементная схема в обоих случаях приводилась к созданию элементов с размерами 28x28 см, расположенных по краям четырехугольника со сторонами 1.65x2.85 м. В первом приближении керамзит моделируем стержнями. Согласно варианту 2 выполняем расчет пола в пространстве, принимаем модуль упругости керамзита $90\,000 \text{ кг/см}^2$, что фактически является средним из минимальных значений. Сам керамзит моделируем стержнями (вариант 1). Вариант 2 – просчитываем пол по керамзиту как на естественном основании, принимая коэффициенты постели от 1500 до 5000 т/м^3 . Также из нагрузки на пол убираем вес керамзита и вес монолитного пола. Их веса учитываются программным комплексом. Бетон класса В20.

В обоих случаях армирование карты не превышает выбранного армирования.

В статье были выполнены расчеты усиления строительных конструкций 2-х этажного корпуса бизнес-центра методом конечных элементов с применением лицензированного программного комплекса программы ЛИРА 9.6 R9 с созданием пространственной модели здания, а именно расчеты усиления плиты над колоннами, опорных участков балок перекрытия, металлических балок перекрытия и колонн по оси 2/И-Р и прогонов покрытия, переопирания бронестены на плиту и стену, устройства разгрузки ребристых плит и сборных ригелей, устройства конструкций стяжки пола 2-го этажа. Также плита и стяжка пола

рассчитаны на нагрузки при дополнительных исходных данных. По результатам расчетов установлено, что принятые решения по усилению строительных конструкций верны и достаточны для безопасной эксплуатации здания. Коэффициенты использования не превышают предельно допустимого значения [5].

Литература

1. Трунтов, П. С. Усиление конструкций перекрытий спортивного комплекса в период реконструкций / П. С. Трунтов, В. И. Римшин // Молодежные инновации : сборник материалов семинара молодых ученых в рамках XXIII Международной научной конференции. – Москва, 2020. – С. 153–157.

2. Кришан, А. Л. Прочность сжатых железобетонных элементов со спиральным армированием / А. Л. Кришан // Архитектура. Строительство. Образование. – 2020. – № 1 (15). – С. 15–21.

3. Меркулов, С. И. Увеличение несущей способности железобетонных изгибаемых конструкций усилением внешним армированием композитным материалом / С. И. Меркулов, С. М. Есипов // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2018. – № 2 (1002). – С. 56–57.

4. Курбатов, В. Л. Каталог архитектурно-строительных решений: виды, материалы, конструкции : учебное пособие / В. Л. Курбатов, В. И. Римшин – Белгород, 2018. – 267 с.

5. Ерофеев, В. Т. Методы обработки экспериментальных данных / В. Т. Ерофеев, И. Н. Максимова, В. В. Афонин ; Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства. – Саранск, 2019.

V.I. Rimshin², E.S. Ketsko¹, P.S. Truntov², I.S. Kuzina², G.S. Bykov¹

¹ *Research Institute for Building Physics of Russian Academy of the Architecture and Construction Sciences*

² *Federal state budget educational of higher education «National research Moscow state university of civil engineering» (NRU MGSU)*

RESULTS OF CALCULATION OF BUILDING CONSTRUCTIONS STRENGTHENING USING FINITE ELEMENT METHOD

The article presents calculations of building structures strengthening in a 2-storey business center building using finite element method with a building spatial model creation. Calculations on strengthening of the slab over the columns, supporting sections of floor beams, metal floor beams and columns along the 2 / I-R axis and covering girders, re-supporting the armor wall on the slab and floors are performed. Also, slab and floor screed are designed for loads with additional initial data. Calculations of building models and its fragments were carried out using the licensed software package LIRA 9.6 R9 program. The columns work was modelled with corresponding bar elements. The metal frame structures work was modelled by three- and four-nodal plate elements. The rolled metal beams work was modelled with corresponding bar elements. Floor slabs are represented by four-nodal plate elements.

Finite element method, building structures strengthening, spatial structures, rod and plate elements.



*С.А. Соловьев, А.А. Соловьева,
В.Ю. Пивень, Л.С. Шевцов*
Вологодский государственный университет

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНОЙ ПЛОСКОЙ ФЕРМЫ

Стальные плоские фермы являются несущими стропильными и подстропильными конструкциями для многих зданий и сооружений. В исследовании разработан вероятностный подход к анализу надежности элементов стальной плоской фермы. Нагрузки на фермы и прочностные характеристики стали элементов фермы представлены в виде случайных величин. Для стохастического моделирования снеговой нагрузки используется закон распределения Гумбеля (двойной экспоненциальный), а для моделирования физико-механических свойств стали – нормальное распределение. Общая надежность фермы представлена в виде условной последовательной механической системы, учитывающей различные критерии предельных состояний для элементов фермы.

Надежность, стальная ферма, случайная нагрузка, снеговая нагрузка, безопасность, вероятность отказа.

Развитие методов оценки механической безопасности элементов строительных конструкций является актуальной научной задачей в свете требований Закона РФ №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». Стальные плоские фермы являются несущими элементами многих зданий и сооружений. Обрушения конструкций такого типа (обрушение покрытия «Трансвааль-парк» в Москве (2004), обрушение конструкций покрытия бассейна «Дельфин» в Пермском крае (2005) и др.) отражает необходимость дальнейшего совершенствования их оценки безопасности при проектировании и эксплуатации.

Показателем механической безопасности может служить надежность, мерой которой является вероятность безотказной работы. Исследование проблемы надежности ферм является актуальной научной задачей [1–3]. В данной работе рассмотрим вероятностный подход к оценке надежности элемента фермы (стержня) при совокупности различных законов распределения в математической модели предельных состояний.

В общем виде условие предельного состояния для элемента фермы (стержня) можно записать как

$$\tilde{N}(\tilde{q}_1, \tilde{q}_2, \dots, \tilde{q}_n) \leq \tilde{N}_{ult}(\tilde{\sigma}_{s,ult}), \quad (1)$$

где $\tilde{N}(\tilde{q}_1, \tilde{q}_2, \dots, \tilde{q}_n)$ – функция продольной силы, зависящая от случайных (по значению) нагрузок \tilde{q}_i на конструкцию плоской фермы $\tilde{q}_1, \tilde{q}_2, \dots, \tilde{q}_n$; $\tilde{N}_{ult}(\tilde{\sigma}_{s,ult})$ – предельное допустимое значение продольной силы на элемент фермы, зависящее от предельного напряжения стали элемента фермы $\tilde{\sigma}_{s,ult}$.

Первоначально необходимо разработать стохастическую модель для описания нагрузки на стержни фермы. В общем виде нагрузки и воздействия на конструкцию фермы можно разделить на нагрузки от собственного веса элементов конструкции покрытия и

собственного веса элементов фермы, снеговые нагрузки и технологические нагрузки.

Нагрузки от собственного веса элементов конструкции покрытия могут быть описаны нормальным законом распределения. Так, в приложении С Eurocode 0 «Basis of structural design» отмечено, что нормальное распределение может быть использовано для описания распределения собственного веса конструкций. Нормальное распределение для описания этих параметров также использовано и в исследовании [1].

Для моделирования снеговой нагрузки чаще используется закон распределения Гумбеля (или двойной экспоненциальный) [4]:

$$F_X(x) = \exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha-x}{\beta}\right)\right], \quad (2)$$

где $\beta \approx \frac{S_X \sqrt{6}}{\pi}$ – мера рассеяния распределения

Гумбеля, S_X – среднеквадратическое отклонение случайной величины X ; $\alpha = m_X - \gamma \cdot \beta \approx m_X - 0,45 \cdot S_X$ – мера центра распределения Гумбеля, γ – постоянная Эйлера-Маскерони.

В случае ограниченной по объему выборки могут быть введены поправки для оценки коэффициентов β и α в виде: $\alpha = m_X - (0,45 + 0,34n^{-0,69}) \cdot S_X$ и $\beta = (0,78 + 1,54n^{-0,75}) S_X$.

Рассмотрим более подробно формирование математической модели предельного состояния. Расчет усилий в стержнях фермы может быть выполнен в аналитической форме на базе известных классических подходов, например, методом моментной точки (рис. 1).

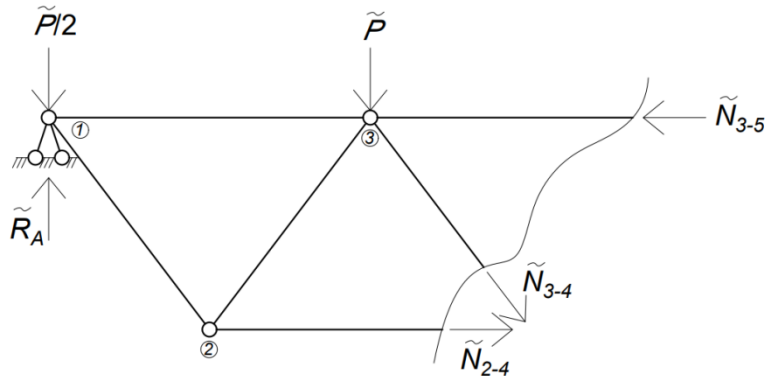


Рис. 1. Общий вид отсеченной части фермы типа «Молодечно» (Серия 1.460.3-14) при использовании метода моментной точки

Переход от равномерно распределенной нагрузки q к сосредоточенной P осуществляется по известному алгоритму через грузовые площади, которые можно считать малоизменчивыми (детерминированными) величинами.

Известно, что усилие \tilde{N}_{3-5} от случайной нагрузки \tilde{P} может быть найдено как

$$\sum M_4 = 0 \rightarrow \tilde{N}_{3-5} \cdot h + \tilde{P} \cdot 0.5 \cdot l_{2-4} + 0.5 \cdot \tilde{P} \cdot (0.5 \cdot l_{1-3} + l_{2-4}) - \tilde{R}_A \cdot (0.5 \cdot l_{1-3} + l_{2-4}) = 0 \quad (3)$$

где \tilde{N}_{i-j} продольная сила в стержне фермы $i-j$; h – высота фермы; l_{i-j} длина элемента $i-j$ фермы.

Из уравнения (3) следует, что любое усилие \tilde{N}_{i-j} может быть выражено в общем виде как

$$\tilde{N}_{i-j}(\tilde{P}) = \tilde{P} \cdot \delta,$$

где δ – коэффициент, зависящий от формы и геометрических размеров фермы.

Подход, в котором узловая нагрузка является случайной по значению вообще, но одинаковой по значению в каждом узле фермы, является обоснованным для стохастических задач в строительной практике. Условно подразумевается, что наперед неизвестно, какое напряжение в стержнях фермы будет от снеговой нагрузки в следующий год, но известно, что снеговая нагрузка будет равномерно распределена по покрытию.

С учетом вышеизложенного, для любого стержня фермы можно составить математическую модель предельного состояния вида:

$$\tilde{N}_{i-j}(\tilde{P}) \leq \tilde{N}_{i-j,ult}, \quad (4)$$

где $\tilde{N}_{i-j,ult}$ – предельное продольное усилие для стержня фермы $i-j$.

Предельное усилие для $i-j$ элемента фермы может быть определено по различным критериям предельных состояний.

Например, по условию прочности стали стержня фермы:

$$\tilde{N}_{i-j}(\tilde{P}) \leq \tilde{N}_{i-j,ult} = \tilde{\sigma}_{s,ult} \cdot A, \quad (5)$$

где A – площадь поперечного сечения стержня фермы; $\tilde{\sigma}_{s,ult}$ – предельное напряжение в стали стержня фермы (случайная величина).

Из условия устойчивости $i-j$ стержня фермы:

$$\tilde{N}_{i-j}(\tilde{P}) \leq \tilde{N}_{i-j,ult} = \tilde{\sigma}_{s,ult} \cdot A \cdot \tilde{\varphi}, \quad (6)$$

где $\tilde{\varphi}$ – коэффициент продольной устойчивости.

Т.к. нагрузки, входящие в математическую модель (1), описываются различными законами распределения (Гумбеля и нормальным), то выражение (4) можно записать в виде:

$$\tilde{N}_{i-j}(\tilde{P}_{snow}) \leq \tilde{N}_{i-j,ult} - \tilde{N}_{i-j}(\tilde{P}_{sw}), \quad (7)$$

где $\tilde{N}_{i-j}(\tilde{P}_{snow})$ – усилие в стержне $i-j$ от снеговой (snow) нагрузки; $\tilde{N}_{i-j}(\tilde{P}_{sw})$ – усилие в стержне $i-j$ от собственного веса (self-weight) конструкций.

В обобщенном виде неравенство (7) можно записать как

$$X \leq Y. \quad (8)$$

Т.к. в обозначение переменной Y входит несколько случайных величин, описываемых нормальным распределением, то статистические параметры могут быть вычислены следующим образом: математическое ожидание $m_y = m_{N_{i-j,ult}} - m_{N_{i-j}}$, среднеквадратическое отклонение $S_y = \sqrt{S^2_{N_{i-j,ult}} + S^2_{N_{i-j}}}$,

где $m_{N_{i-j,ult}}$ – математическое ожидание предельного продольного усилия в стержне $i-j$; $m_{N_{i-j}}$ – математическое ожидание продольного усилия в стержне $i-j$ от собственного веса конструкций; $S_{N_{i-j,ult}}$ – среднеквадратическое отклонение предельного продольного усилия в стержне $i-j$; $S_{N_{i-j}}$ – среднеквадратическое отклонение продольного усилия в стержне $i-j$ от собственного веса конструкций. Для случайной величины X используется распределение и параметры по выражению (2).

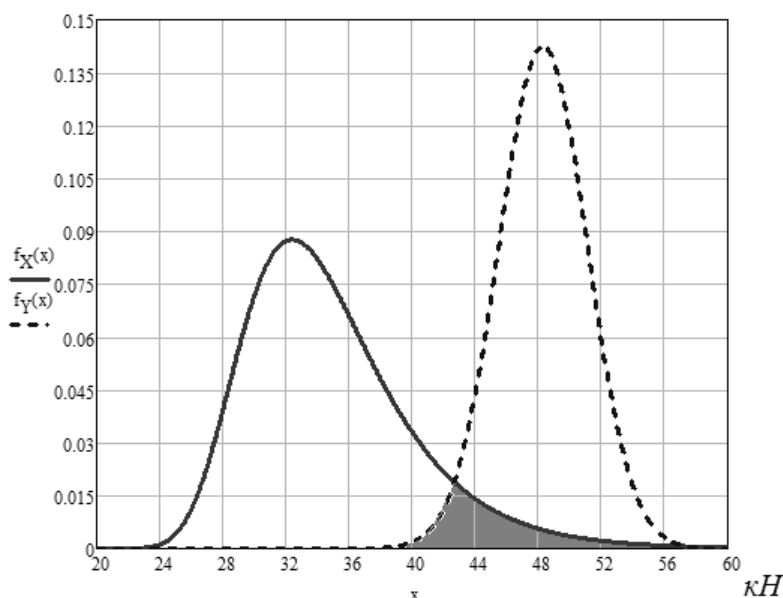


Рис. 2. Пример функции плотностей вероятностей распределения усилия в элементе фермы от снеговой нагрузки как случайной величины X и предельного усилия Y

Вероятность отказа для математической модели вида (8) можно вычислить по формуле [5]:

$$Q = \int_0^{+\infty} f_X(x) F_Y(x) dx, \quad (9)$$

где $f_X(x)$ – плотность распределения случайной величины X ; $F_Y(x)$ – функция распределения случайной величины Y .

С учетом принятых выше законов распределения для модели (7) можно записать выражение (9) в виде:

$$Q = \int_0^{+\infty} \frac{1}{\beta} \exp\left[-\frac{\alpha-x}{\beta}\right] \exp\left[-\frac{\alpha-x}{\beta}\right] \cdot 0,5 \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x-m_y}{\sqrt{2S_y^2}}\right)\right] dx, \quad (10)$$

где $\operatorname{erf}()$ – функция ошибок (error function).

После вычисления параметров α , β , m_y и S_y , вероятность отказа Q по (7) рассчитывается в программе MathCAD или аналогичной ей.

Вероятность безотказной работы для стержня фермы $i-j$ по рассматриваемому предельному состоянию вычисляется как $P_{i-j} = 1 - Q_{i-j}$.

Графически решение (10) представляет собой поиск площади пересечения функций плотностей распределения случайных величин X и Y (рис. 2).

Для комплексной оценки надежности стального элемента требуется выполнить расчеты по определению его вероятности отказа по всем критериям предельных состояний (прочность, устойчивость, гибкость). В этом случае элемент фермы может быть представлен в виде последовательной условной механической системы [5], когда отказ одного условного элемента (наступление любого предельного состояния) приводит к отказу всего стержня фермы. Математически комплексную надежность элемента фермы можно рассчитать перемножением вероятностей безотказной работы

для элемента фермы по всем критериям предельных состояний: $P_{i-j}^{full} = \prod P_{i-j}$.

В исследовании рассмотрен вероятностный подход к оценке надежности элемента фермы (стержня) с учетом различных распределений вероятностей случайных величин в математической модели предельного состояния.

Предложенный подход позволяет дать стохастическое обоснование по оценке наиболее опасных стержней фермы с точки зрения вероятности их отказа.

Надежность элемента фермы должна быть рассчитана по всем критериям предельных состояний, после чего выполняется комплексная оценка надежности.

Литература

1. Assessment of steel truss fire safety in terms of the system reliability analysis / K. Kubicka, P. Obara, U. Radoń, W. Szaniec // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2019. – Vol. 19. – Issue 2. – P. 417–427.
2. Reliability assessment of truss structures with natural frequency constraints using metaheuristic algorithms / S. Rohollah, H. Vaez, H. Mehanpour, M. A. Fathali // Journal of Building Engineering. – 2020. – Vol. 28. – 101065.
3. Behavior and design for component and system of cold-formed steel roof trusses / M. Reda, T. Sharaf, A. ElSabbagh, M. ElGhandour // Thin-Walled Structures. 2019. – Vol. 135. – P. 21–32.
4. Золина, Т. В. Моделирование снеговой нагрузки на покрытие промышленного здания / Т. В. Золина, П. Н. Садчиков // Вестник МГСУ. – 2020. – № 8. – С. 25–33.

5. Соловьев, С. А. Моделирование случайной статической нагрузки на покрытия сооружений при неполной статистической информации / С. А. Соловьев // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2020. – Т. 16, № 4. – С. 243–249.

*S.A. Solovev, A.A. Soloveva, V.Yu. Piven, L.S. Shevcov
Vologda State University*

STRUCTURAL RELIABILITY ANALYSIS OF PLANAR TRUSS ELEMENTS

Steel planar trusses use as load-bearing truss and sub-truss structures for many buildings. The article presents a probabilistic approach to the reliability assessment of steel planar truss elements. The loads on the trusses and the strength properties of the steel elements of the truss are presented as random variables. The Gumbel distribution (double exponential distribution) is used for stochastic modeling of snow load, and the normal distribution is used for modeling the physical and mechanical properties of steel. The overall reliability of the truss is presented as a conditional sequential mechanical system that takes into account various limit state criteria for truss elements.

Reliability, steel truss, random load, snow load, safety, failure probability



ИОННЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ КАК СПОСОБ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

Данная работа посвящена исследованию возможности применения стабилизатора «UNDERBOLD» для глинистых грунтов Вологодской области. Показано влияние стабилизатора на сохранение предела прочности на сжатие укрепленных грунтов, которое зависит от содержания глинистых частиц (вида грунта) и может достигать 30 % в случае применения рекомендуемой производителем технологии. Применение стабилизатора «UNDERBOLD» по предлагаемой нами технологии (обработка стабилизатором – высушивание – укрепление цементом) обеспечивает повышение прочности укрепленного грунта после водонасыщения до 2-х и более раз по сравнению с образцами без стабилизатора. Показано, что при проектировании дорожной одежды с использованием местных глинистых грунтов, укрепленных стабилизатором «UNDERBOLD», необходимо предусмотреть устройство водоизолирующей прослойки, а также необходимого водоотвода позволяющих повысить работоспособность конструктивного слоя. Отмечено, что данный стабилизатор не является реагентом, снижающим влияние морозного пучения.

Грунты, дорожная одежда, химический стабилизатор, укрепление грунтов, морозное пучение, прочность, водостойкость.

В последние десятилетия широко используются химические стабилизаторы для укрепления грунтов. Опыт применения данного способа укрепления показывает хорошие результаты: укрепленные грунты полностью исключают использование в основании дорожной одежды щебня и гравия. Вследствие этого экономия на материалах, горючем и рабочей силе достигает 50 % от стоимости всей автомобильной дороги [1, 2].

Принцип работы стабилизаторов грунта заключается в необратимом изменении физико-механических свойств грунта за счет химического воздействия раствора стабилизатора при его внесении в грунт. Воздействие происходит путем ионного замещения пленочной воды на поверхности глинистых и пылеватых частиц грунта молекулами модификатора. В результате чего глинистые частицы грунта становятся меньше, а грунт после уплотнения приобретает более высокую максимальную плотность, чем необработанный, при одинаковом количестве проходов катка. Кроме того, молекулы стабилизатора, которые прикрепляются к поверхности глинистой частицы, обладают водоотталкивающим действием, и частицы грунта теряют способность притягивать к своей поверхности пленочную воду. Улучшенный таким образом грунт становится более прочным и практически водонепроницаемым, что делает его устойчивым к воздействию любых климатических условий и способным воспринимать увеличенную полезную нагрузку даже в условиях длительных, обильных осадков.

Особенно эффективно использование модификатора для обработки пластичных и высокопластичных пучинистых глинистых грунтов. В результате обработки грунта стабилизатором вся пленочная вода с поверхности глинистых частиц переходит в грунте в свободное состояние и легко выводится из него, а степень пучения и набухания грунтов резко уменьшается, т.е. грунт фактически переводится в непучини-

стое состояние. На российском рынке предлагается большой выбор зарубежных и отечественных стабилизаторов. Это гидрофобизатор грунта LBS (компания «ENVIROSEAL», США), стабилизатор «ANT» (ЗАО «Агентство Новых Технологий», Россия), Консолид («CONSOLID AD», Швейцария), Roadbond EH-1 (США), Roadbond SPP (совместное производство России и Южно-Африканской Республики), RRP-235 Spezial (Германия), Terrastone (Германия), Дорзин (Украина) и другие.

Целью данной работы является исследование возможности применения стабилизатора «UNDERBOLD» для глинистых грунтов Вологодской области. Данный стабилизатор был разработан в Германии и успешно применяется во многих странах, где KaHel International является единственным обладателем лицензии на использование этой безвредной, защищенной немецкими патентами, известной и проверенной на практике технологии устройства дорог. Поэтому данное исследование представляется актуальным.

Для исследования стабилизатора «UNDERBOLD» служили 5 видов грунтов, отобранных из карьеров Вологодской области. Физические характеристики этих грунтов и степень пучинистости определялись в соответствии с нормативными требованиями (табл. 1, 2) [3, 4].

Таблица 1
Нормативные требования для грунта

Характеристики грунта	ГОСТ №
Влажность на границе раскатывания и текучести	5180-2015
Плотность твердых частиц	
Гранулометрический состав грунтов	12536-2014
Максимальная плотность и оптимальная влажность	22733-2016
Степень пучинистости	28622-2012

Таблица 2

Физические характеристики грунтов

Характеристики грунтов / № вида грунта	1	2	3	4	5
Влажность на границе раскатывания, д.е.	0,20	0,17	0,14	0,16	0,12
Влажность на границе текучести, д.е.	0,39	0,28	0,26	0,23	0,17
Число пластичности Ip, д.е.	0,19	0,11	0,12	0,07	0,05
Плотность частиц грунта, г/см ³	2,73	2,73	2,71	2,71	2,7
Максимальная плотность, г/см ³	2,2	2,03	2,01	2	2
Оптимальная влажность, д.е.	0,18	0,11	0,14	0,13	0,12
Относительная деформация морозного пучения, %	7,9	-	-	-	-

Подготовку отобранных грунтов к испытаниям выполняют в следующей последовательности:

1. Грунт доводится до воздушно-сухого состояния путем прогрева его в сушильном шкафу при температуре 105 °С. В процессе сушки грунт периодически перемешивают. Высушенный грунт должен иметь влажность, не превышающую значений, указанных в таблице 3.

Таблица 3

Значения влажности для грунтов

Грунты	Влажность грунта, %
Песок гравелистый, крупный и средней крупности	4
Песок мелкий и пылеватый	6
Супесь, суглинок легкий	6–8
Суглинок тяжелый, глина	10–12

2. Воздушно-сухой грунт, без нажима на него, растирают в фарфоровой ступке пестиком с резиновым наконечником с целью разъединения отдельных структурных агрегатов.

3. Высушенный и измельченный грунт тщательно перемешивают для достижения его однородности [5].

Для укрепления грунта принимался цемент марки 500 (ГОСТ 10178-85). Технология приготовления укрепленного неорганическим вяжущим грунта приведена в ГОСТ 23558-94 [6].

При использовании стабилизатора в эту технологию внесены изменения в соответствии с рекомендациями, содержащимися в сопроводительных к нему материалах. В этом случае технологические операции по укреплению цементом грунта с использованием стабилизатора выполнялись в следующей последовательности:

1. Приготовление водной эмульсии концентрата «UNDERBOLD» (3 части концентрата на 100 частей воды).

2. Подготовка навески грунта с оптимальной влажностью.

3. Добавка в подготовленную навеску грунта эмульсии «UNDERBOLD» в пропорции 50 л на 1 м³ грунта и тщательное перемешивание.

4. Выдерживание готовой смеси не менее 30 минут.

5. Внесение в подготовленную смесь вяжущего в количестве 5 % от объема грунта.

6. Уплотнение готовой смеси в формах при коэффициенте стандартного уплотнения 0,98.

7. Выдерживание образца в течение 28 суток и проведение испытаний.

Для исследования влияния стабилизатора «UNDERBOLD» на водонасыщение образцы укрепленного грунта взвешивались перед водонасыщением (после набора прочности в течение 28 суток) и после водонасыщения (в течение 48 часов). Водонасыщение определялось алгебраической разницей масс до водонасыщения и после. Среднее водонасыщение определялось как среднее для серии из трех образцов.

Для определения среднего расчетного сопротивления определялись площадь сечения кубика в см² и выдерживаемая нагрузка в кН при испытании на гидравлическом прессе водонасыщенных образцов. Среднее расчетное сопротивление в МПа определялось как среднее для серии из трех образцов.

Все полученные экспериментальные результаты для анализа сведены в единую таблицу 4.

Таблица 4

Результаты экспериментальных исследований грунта

№ вида грунта	образца	компоненты			среднее расчетное сопротивление, МПа	среднее водонасыщение, %
		Ip, д.е.	вяжущее	стабилизатор		
1	1, 2, 3	0,19	Ц 5 %	2 %	1,371	0,156
1	7, 8, 9	0,19	Ц 5 %	-	1,083	0,354
3	4, 5, 6	0,12	Ц 5 %	2 %	0,716	0,259
3	10, 11, 12	0,12	Ц 5 %	-	0,653	0,229
2	13, 14, 15	0,11	Ц 5 %	2%	1,002	0,586
2	16, 17, 18	0,11	Ц 5 %	-	0,916	0,494
4	19, 20, 21	0,07	Ц 5 %	2 %	1,072	0,478
4	22, 23, 24	0,07	Ц 5 %	-	1,677	0,628
5	25, 26, 27	0,05	Ц 5 %	-	1,931	0,436
5	28, 29, 30	0,05	Ц 5 %	2 %	2,277	0,261
3	31, 32, 33	0,12	Ц 7,5 %	-	1,107	0,197
3	34, 35, 36	0,12	Ц 7,5 %	2 %	1,298	0,261
3	37, 38, 39	0,12	Ц 10 %	-	1,346	0,230
3	40, 41, 42	0,12	Ц 10 %	2 %	1,838	0,228
3	43, 44, 45	0,12	Ц 5 %	4 %	0,605	0,365
3	52, 53, 54	0,12	Ц 5 %	6 %	0,635	0,303
3	55, 56, 57	0,12	Ц 5 %	2 %	1,420	0,293

Как видно из таблицы, прочность повысилась после обработки стабилизатором практически у всех образцов (исключением является суглинок с числом пластичности 7). Наибольшая разница между средними расчетными сопротивлениями обработанного и необработанного грунтов получилась у супеси (0,346 МПа) и у глины (0,288 МПа). У суглинков разница не такая большая, но все же есть. У суглинка с числом пластичности 12 она составляет 0,063 МПа, а у суглинка с числом пластичности 10,5 – 0,086 МПа.

У глины, обработанной стабилизатором, водонасыщение уменьшилось в два раза. Также водонасыщение уменьшилось у суглинка с числом пластичности 7 на 0,15 % и у супеси на 0,175 %. У суглинков с числом пластичности 12 и 11 водонасыщение увеличилось на 0,03 и 0,092 % соответственно.

На диаграмме (рис. 1) приведены экспериментальные результаты влияния различного количества вяжущего на прочность укрепленного грунта.

Отчетливо видно, что прочность увеличивается с увеличением процентного содержания в укрепленном

грунте цемента. Так разница между средними расчетными сопротивлениями образцов грунта, обработанного стабилизатором и не обработанных, с содержанием вяжущего равным 5 % составляет 0,063 МПа, 7,5 % – 0,191 МПа, а 10 % – 0,492 МПа.

Таким образом, можно с уверенностью констатировать, что с увеличением количества вяжущего растет и показатель прочности грунта.

Результаты влияния различного количества стабилизатора «UNDERBOLD» на прочность укрепленного грунта приведены на рисунке 2.

С увеличением количества стабилизатора в два и в три раза среднее расчетное сопротивление грунта падает. При количестве стабилизатора 2 % от массы грунта прочность увеличивается на 0,063 МПа, а при 4 и 6 % падает на 0,048 и 0,018 МПа соответственно. Следовательно, необходимо строго придерживаться рекомендуемой технологии и выдерживать концентрацию стабилизатора, которую указывает держатель патента-лицензии.

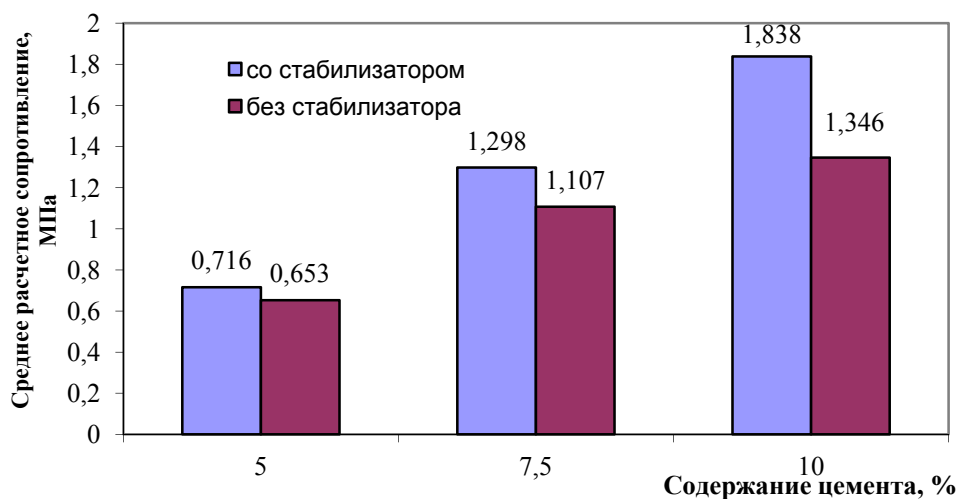


Рис. 1. Экспериментальные результаты влияния различного количества вяжущего на прочность укрепленного грунта

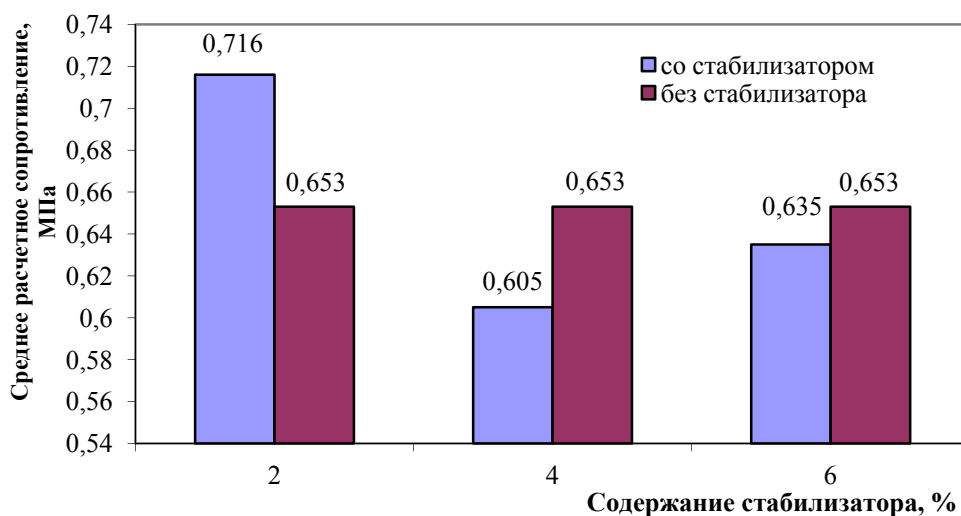


Рис. 2. Результаты влияния различного количества стабилизатора на прочность укрепленного грунта

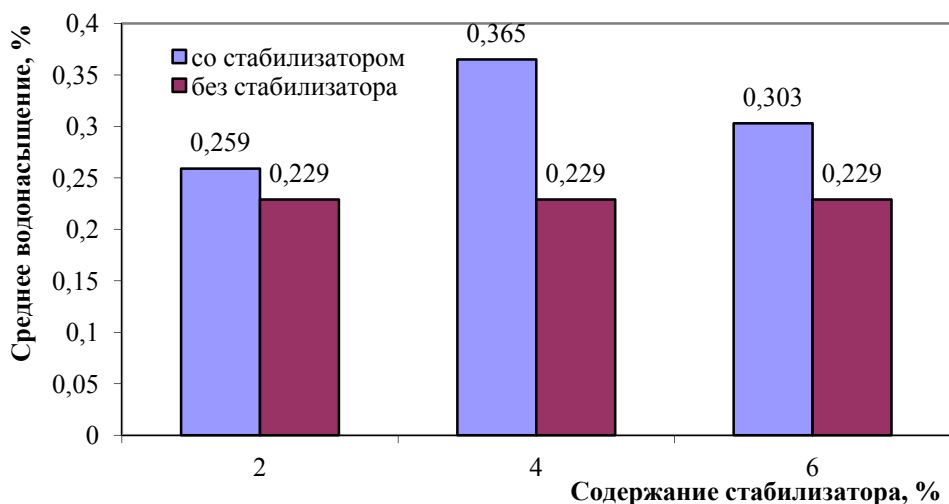


Рис. 3. Анализ влияния различного количества стабилизатора на водонасыщение укрепленного грунта

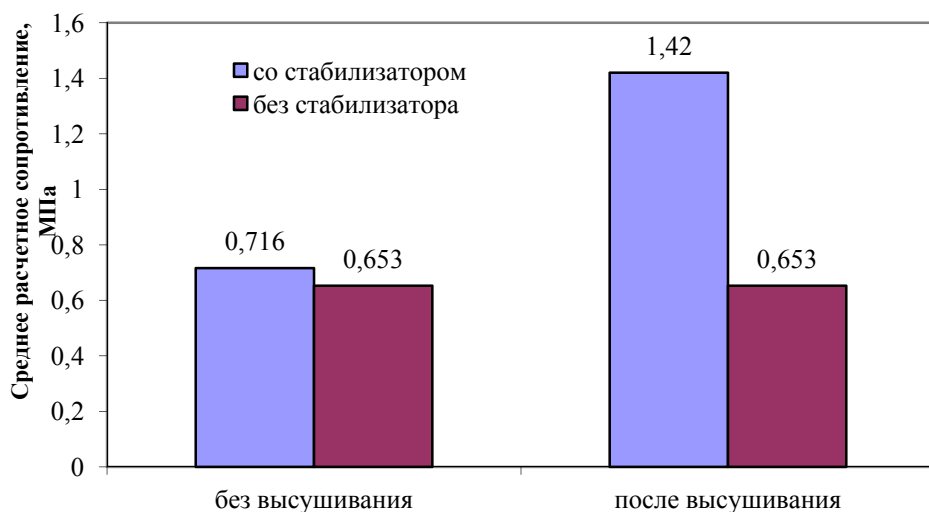


Рис. 4. Влияния технологии обработки стабилизатором глинистого грунта на его прочность

Анализ влияния различного количества стабилизатора «UNDERBOLD» на водонасыщение укрепленного грунта показан на следующей диаграмме (рис. 3).

С увеличением количества стабилизатора в два и в три раза среднее водонасыщение увеличивается. При обработке грунта стабилизатором в количестве 2 % от общей массы грунта, водонасыщение увеличивается не значительно на 0,03 %. Увеличение количества стабилизатора до 4 % ведет к резкому возрастанию водонасыщения на 0,136 %. При увеличении количества стабилизатора до 6 % водонасыщение возрастает до 0,74 %.

На диаграмме (рис. 4) показано влияния технологии обработки стабилизатором «UNDERBOLD» глинистого грунта на прочность этого грунта.

Шесть образцов были изготовлены по технологии, рекомендуемой изготовителем стабилизатора.

Разница между средними расчетными сопротивлениями небольшая, но есть. Сопротивление у образцов, обработанных стабилизатором, выше на 0,063 МПа.

Шесть образцов были изготовлены по предложенной методике (обработка 2-х процентным раствором стабилизатора грунта, доведенного до оптимальной влажности; полное высушивание обработанного грунта; добавление вяжущего (цемента) в грунт оптимально увлажненный). Разница между получившимися результатами составляет 0,767 МПа. Это значит, что при использовании данной технологии среднее расчетное сопротивление обработанного грунта возрастает в 2,5 раза по сравнению с необработанным грунтом.

Экспериментальные результаты влияния технологии обработки стабилизатором «UNDERBOLD» глинистого грунта на водонасыщение этого грунта показаны на следующей диаграмме (рис. 5).

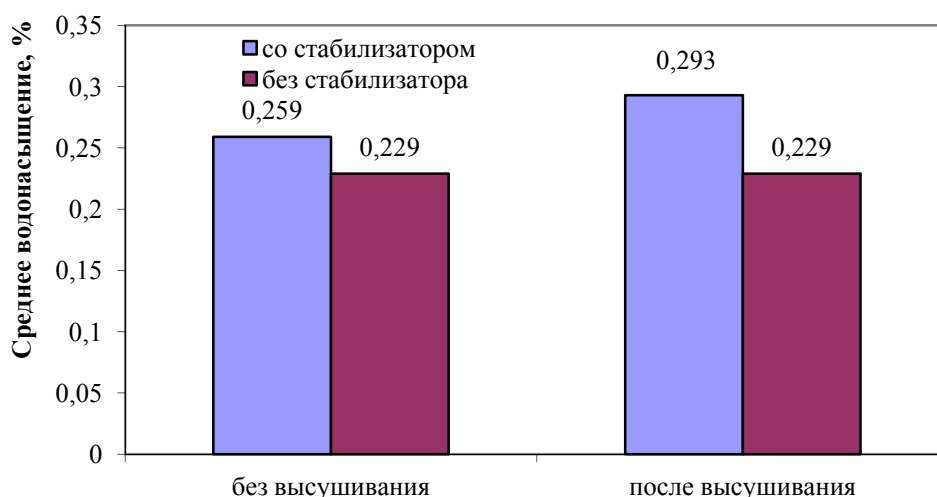


Рис. 5. Экспериментальные результаты влияния технологии обработки стабилизатором глинистого грунта на его водонасыщение

Таблица 5

Результаты экспериментальных исследований грунта до и после стабилизации

№ пп.	Вид грунта	Относительная деформация морозного пучения ϵ_{fn} , %	Степень морозного пучения грунта
1	Не обработанный стабилизатором	7,9	Сильнопучинистый
2	Обработанный стабилизатором по Способу № 1	8,45	Сильнопучинистый
3	Обработанный стабилизатором по Способу № 2	4,5	Среднепучинистый

Результаты экспериментальных исследований образцов грунта до и после стабилизации на показатели морозного пучения представлены в таблице 5.

Выводы:

1. Влияние стабилизатора «UNDERBOLD» на сохранение предела прочности на сжатие укрепленных грунтов зависит от содержания глинистых частиц (вида грунта) и может достигать 30 % в случае применения рекомендуемой производителем технологии.

2. Применение стабилизатора «UNDERBOLD» по предлагаемой нами технологии (обработка стабилизатором – высушивание – укрепление цементом) обеспечивает повышение прочности укрепленного грунта после водонасыщения до 2-х и более раз по сравнению с образцами без стабилизатора.

3. При проектировании дорожной одежды с использованием местных глинистых грунтов укрепленных стабилизатором «UNDERBOLD» необходимо предусмотреть устройство водоизолирующей прослойки

4. Данный стабилизатор не является реагентом, снижающим явление морозного пучения (при испытании на морозное пучение получен отрицательный результат). Для рекомендации новых химических реагентов в качестве противогололедных добавок необходимо иметь результаты экспериментальных определений их влияния на пучинистые свойства грунта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безрук, В. М. Укрепленные грунты (Свойства и применение в дорожном и аэродромном строительстве) / В. М. Безрук, И. Л. Гурчиков, Р. А. Агапова [и др.]. – Москва : Транспорт, 1982. – 231 с.
2. Технология укрепления грунтов «ANT». ЗАО «Агентство Новых Технологий» : официальный сайт. – URL: <http://ant-rus.ru> (дата обращения: 17.12.2020). – Текст : электронный.
3. Каган, Г. Л. Разработки в области строительства сооружений на сезоннопромерзающих грунтах : монография / Г. Л. Каган, В. А. Шорин, А. Ю. Вельсовский ; Министерство образования и науки РФ, Вологодский государственный университет. – Вологда : ВоГУ, 2016. – 184 с.
4. Бирюков, Н. С. Методическое пособие по определению физико-механических характеристик грунтов / Н. С. Бирюков, В. Д. Казарновский, Ю. Л. Мотылев. – Москва : Недра, 1975. – 176 с.
5. ГОСТ 23558-94. Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства : введен 1995-01-01. – Москва : Издательство стандартов, 1995. – 8 с.

V.A. Shorin, A.Y. Velsovsky
Vologda State University

**ION STABILIZERS AS A WAY TO IMPROVE
THE CHARACTERISTICS OF CLAY SOILS**

This work is devoted to the study of the possibility of using the stabilizer "UNDERBOLD" for clay soils of Vologda region. The effect of the stabilizer on the preservation of the compressive strength of reinforced soils, which depends on the content of clay particles (type of soil) and can reach 30 % if the manufacturer recommends the technology. The use of the "UNDERBOLD" stabilizer, according to the technology we offer (stabilizer treatment-drying-cement strengthening), provides an increase in the strength of the reinforced soil after water saturation up to 2 or more times compared to samples without a stabilizer. It is shown that when designing a pavement using local clay soil reinforced stabilizer "UNDERBOLD", water isolation layer as well as the necessary drainage which allows to increase the efficiency of the structural layer should be provided. It is noted that this stabilizer is not a reagent that reduces the phenomenon of frost heaving.

Soil, road clothing, chemical stabilizer, soil strengthening, frost heaving, strength, water resistance.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Аваев Александр Алексеевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Череповецкого государственного университета (Череповец, Россия)

chsu@chsu.ru

Белоусов Андрей Леонидович

кандидат экономических наук, доцент Департамента правового регулирования экономической деятельности Финансового университета при Правительстве России (Москва, Россия)

andreybelousov@mail.ru

Белоусова Виктория Павловна

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)

belousova.v2011@mail.ru

Белянина Анна Юрьевна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры математики и информатики Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)

belianinaaiu@vogu35.ru

Бормосов Николай Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)

bormosovna@vogu35.ru

Быков Григорий Сергеевич

магистрант кафедры строительных материалов и технологий архитектурно-строительного факультета Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва (Саранск, Россия), инженер Научно-исследовательского института строительной физики (Москва, Россия)

admin.nex@gmail.com

Вельсовский Анатолий Юрьевич

кандидат технических наук, заведующий кафедрой автомобильных дорог Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)

vau@vogu35.ru

Вольников Михаил Иванович

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации и управления Пензенского государственного технологического университета (Пенза, Россия)

vmi1972@yandex.ru

Габиров Нурулла Наджафович

кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)

gabibovnn@vogu35.ru

Габимова Аида Нуруллаевна

обучающийся Инженерно-строительного института Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)

terrytyan@yandex.ru

Гашицкий Максим Сергеевич

обучающийся Пензенского государственного технологического университета (Пенза, Россия)

maxgashitskiy@mail.ru

Калайдо Александр Витальевич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологий производства и профессионального образования Луганского государственного педагогического университета (Луганск, ЛНР)
kalaydo@mail.ru

Карпов Денис Федорович

старший преподаватель кафедры теплогазоводоснабжения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
karpovdf@vogu35.ru

Кецко Екатерина Сергеевна

аспирант лаборатории № 55 «Мониторинг жилищно-коммунального комплекса и радиационной безопасности в строительстве» Научно-исследовательского института строительной физики (Москва, Россия)
kuzzina@mail.ru

Корнеев Андрей Петрович

старший преподаватель кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок Белорусско-Российского университета (Могилёв, Республика Беларусь)
AnKorn@tut.by

Кочкарева Татьяна Александровна

кандидат технических наук, доцент кафедры математики и информатики Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
tsk35@mail.ru

Кузина Ирина Сергеевна

обучающийся Московского государственного строительного университета (Москва, Россия)
ms.kuzina01@mail.ru

Кузьмин Александр Григорьевич

доктор медицинских наук, профессор, профессор кафедры управляющих и вычислительных систем Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
bmt@vogu35.ru

Никифорова Мария Михайловна

обучающийся Института управления, экономики и юриспруденции Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
tigr.2010@mail.ru

Павлов Михаил Васильевич

кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоводоснабжения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
pavlovmv@vogu35.ru

Пивень Валентина Юрьевна

обучающийся Инженерно-строительного института Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
nya.vaske@yandex.ru

Поварова Ольга Александровна

старший преподаватель кафедры строительства Инженерно-технического института Череповецкого государственного университета (Череповец, Россия)
boliaa@mail.ru

Полужкова Надежда Андреевна

обучающийся Инженерно-технического института Череповецкого государственного университета (Череповец, Россия)
Kagura.tian17@yandex.ru

Поляков Тимофей Александрович

обучающийся Инженерно-технического института Череповецкого государственного университета (Череповец, Россия)
polyackov.t@yandex.ru

Попов Игорь Павлович

старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов Курганского государственного университета (Курган, Россия)
ip.porow@yandex.ru

Римшин Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РААСН, руководитель института развития города Научно-исследовательского института строительной физики РААСН, профессор кафедры жилищно-коммунального комплекса НИУ Московского государственного строительного университета (Москва, Россия)
v.rimshin@niisf.ru

Сапиев Азамат Заурбиевич

кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры информационной безопасности и прикладной информатики Майкопского государственного технологического университета (Майкоп, Республика Адыгея)
sapiew@yandex.ru

Семенова Мария Николаевна

ведущий инженер Научно-исследовательского института строительной физики РААСН (Москва, Россия)
lor267gg@yandex.ru

Соловьев Сергей Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства Инженерно-строительного института Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
solovevsa@vogu35.ru

Соловьева Анастасия Андреевна

аспирант кафедры промышленного и гражданского строительства Инженерно-строительного института Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
solovevaaa@vogu35.ru

Степанов Александр Сергеевич

кандидат технических наук, заведующий кафедрой технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
alex.stepanov@mail.ru

Трунтов Павел Сергеевич

магистрант кафедры жилищно-коммунального комплекса Московского государственного строительного университета (Москва, Россия)
pavel_truntov@mail.ru

Умаров Максуджон Файзулович

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры управляющих и вычислительных систем Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
umma54@rambler.ru

Фролов Александр Анатольевич

кандидат технических наук, директор Института машиностроения, энергетики и транспорта Вологодского государственного технического университета (Вологда, Россия)
fa73@mail.ru

Шапкина Вероника Андреевна

кандидат педагогических наук, доцент кафедры автомобильных дорог Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
vtnk@bk.ru

Шевцов Леонид Сергеевич

обучающийся Инженерно-строительного института Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
sle6488@gmail.com

Шорин Владимир Александрович

доктор химических наук, профессор, профессор кафедры автомобильных дорог Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
ad@vogu35.ru

Щекин Сергей Михайлович

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
ship12g@gmail.com

Яхричев Виктор Васильевич

старший преподаватель кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)
yahrichev@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Avaev Aleksandr Alekseevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, Cherepovets State University (Cherepovets, Russia)
chsu@chsu.ru

Belousov Andrey Leonidovich

Candidate of Economics, Associate Professor of the Department of Law Regulation of Economic Activity, Financial University under the Government of the Russian Federation (Moscow, Russia)
andreybelousov@mail.ru

Belousova Viktoriya Pavlovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine Building Technology, Vologda State University (Vologda, Russia)
belousova.v2011@mail.ru

Belyanina Anna Yuryevna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics and Information Technology, Vologda State University (Vologda, Russia)
belianinaaiu@vogu35.ru

Bormosov Nikolay Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobiles and Automobile Industry, Vologda State University (Vologda, Russia)
bormosovna@vogu35.ru

Bykov Grigory Sergeevich

Master student of the Department of Construction Materials and Technologies, Architecture and Construction Faculty, Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia), Engineer of Scientific Research Institute of Construction Physics (Moscow, Russia)
admin.nex@gmail.com

Velsovsky Anatoly Yuryevich

Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Automobile Roads, Vologda State University (Vologda, Russia)
vau@vogu35.ru

Volnikov Mikhail Ivanovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation and Control, Penza State University (Penza, Russia)
vmi1972@yandex.ru

Gabibov Nurulla Nadzhafovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Roads, Vologda State University (Vologda, Russia)
gabibovnn@vogu35.ru

Gabibova Aida Nurullaevna

Student of the Institute of Civil engineering, Vologda State University (Vologda, Russia)
terrytyan@yandex.ru

Gashitsky Maxim Sergeevich

Student of Penza State Technological University (Penza, Russia)
maxgashitskiy@mail.ru

Kalaydo Aleksandr Vitalyevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Production Technology and Professional Education, Lugansk State Pedagogical University (Lugansk, LNR)
kalaydo@mail.ru

Karpov Denis Fyodorovich

Senior Lecturer of the Department of Heat and Gas Supply, Vologda State University (Vologda, Russia)
karpovdf@vogu35.ru

Ketsko Ekaterina Sergeevna

Post graduate student of Laboratory № 55 “Monitoring of Housing and Utility Complex and Radiological Safety in Construction” of Scientific Research Institute of Construction Physics (Moscow, Russia)
kuzzina@mail.ru

Korneev Andrey Petrovich

Senior Lecturer of the Department of Electric Drive and Automation of Industrial Installations, Belarus-Russia University (Mogilev, Belarus)
AnKorn@tut.by

Kochkaryova Tatyana Aleksandrovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics and Information Technology, Vologda State University (Vologda, Russia)
tsk35@mail.ru

Kuzina Irina Sergeevna

Student of Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)
Kru444inen@mail.ru

Kuzmin Aleksandr Grigoryevich

Doctor of Medicine, Professor, Professor of the Department of Control and Computing Systems, Vologda State University (Vologda, Russia)
bmt@vogu35.ru

Nikiforova Mariya Mikhailovna

Student of the Institute of Management, Economics and Law, Vologda State University (Vologda, Russia)
tigr2010@mail.ru

Pavlov Mikhail Vasilyevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Heat and Gas Supply, Vologda State University (Vologda, Russia)
pavlocmv@vogu35.ru

Piven Valentina Yuryevna

Student of Civil Engineering Institute, Vologda State University (Vologda, Russia)
nya.vaske@yandex.ru

Povarova Olga Aleksandrovna

Senior Lecturer of the Department of Construction, Cherepovets State University (Cherepovets, Russia)
boliaa@mail.ru

Poluektova Nadezhda Andreevna

Student of Civil Engineering Institute, Cherepovets State University (Cherepovets, Russia)
Kagura.tian17@yandex.ru

Polyakov Timofey Aleksandrovich

Student of Construction of Technical Institute of Cherepovets State University (Cherepovets, Russia)
polyackov.t@yandex.ru

Popov Igor Pavlovich

Senior lecturer of the Department of Machine Building Technology, Metal-cutting Machines and Tools, Kurgan State University (Kurgan, Russia)
ip.popow@yandex.ru

Rimshin Vladimir Ivanovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Corresponding member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, the Head of the Institute of City Development of Scientific Research Institute of Construction Physics of RAACN, Professor of the Department of Household and Utility Complex of Scientific Research University of Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)
v.rimshin@niisf.ru

Sapiev Azamat Zaurbievich

Candidate of Economics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of IT Security and Applied Informatics, Maykop State Technological University (Maykop, Adygea Republic)
sapiew@yandex.ru

Semyonova Mariya Nikolayevna

The Leading engineer of Scientific Research Institute of Construction Physics of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow, Russia)
Lor267gg@yandex.ru

Solovyev Sergey Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Engineering of Civil Engineering Institute, Vologda State University (Vologda, Russia)
solovevsa@vogu35.ru

Solovyeva Anastasiya Andreevna

Post graduate student of the Department of Industrial and Civil Engineering of Civil Engineering Institute, Vologda State University (Vologda, Russia)
solovevaaa@vogu35.ru

Stepanov Aleksandr Sergeevich

Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Machine Building Technology, Vologda State University (Vologda, Russia)
alex.stepanov@mail.ru

Truntov Pavel Sergeevich

Master student of the Department of Household and Utility Complex, Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)
pavel_truntov@mail.ru

Umarov Maksudzhon Fayzuloevich

Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of the Department of Control and Computing Systems, Vologda State University (Vologda, Russia)
umma54@rambler.ru

Frolov Aleksandr Anatolyevich

Candidate of Technical Sciences, Director of the Institute of Machine Building, Power Engineering and Transport, Vologda State University (Vologda, Russia)
fa73@mail.ru

Shapkina Veronika Andreevna

Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Automobile Roads, Vologda State University (Vologda, Russia)
vrnk@bk.ru

Shevtsov Leonid Sergeevich

Student of Civil Engineering Institute, Vologda State University (Vologda, Russia)
sle6488@gmail.com

Shorin Vladimir Aleksandrovich

Doctor of Chemistry, Professor, Professor of the Department of Automobile Roads, Vologda State University (Vologda, Russia)
ad@vogu35.ru

Shechkin Sergey Mikhailovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machine Building Technology, Vologda State University (Vologda, Russia)
ship12g@gmail.com

Yakhrichev Viktor Vasilyevich

Senior Lecturer of the Department of Machine Building Technology, Vologda State University (Vologda, Russia)
yahrichev@yandex.ru

Научное издание

ВЕСТНИК ВОЛОГОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия: Технические науки
№ 4 (10) / 2020

Главный редактор А. А. Кочкин

Свидетельство о регистрации СМИ: ПИ № ФС77-75456 от 05.04.2019 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций
(Роскомнадзор)

Подписано в печать 25.12.2020. Выпуск в свет 29.12.2020. Формат 60 × 84/8
Уч.-изд. л. 10,1. Усл. печ. л. 12,0. Тираж 35 экз. Заказ № 1035. Бесплатно

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет»
160000, Вологодская область, город Вологда, улица Ленина, дом 15

Отпечатано: ООО «Вологодская типография»
г. Вологда, ул. Преображенского, 4
тел.: 8(8172) 71-08-58, 71-01-38, e-mail: poligraphmaster@mail.ru