

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.

**№ 1 (7) / 2020**

СЕРИЯ: ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

ВОЛОГДА  
2020

№ 1 (7) / 2020 / АПРЕЛЬ. 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](http://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, директор инженерно-строительного института 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 молочно-хозяйственной 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,

*Л.Э. Шашкова*, кандидат технических наук, зам. директора инженерно-строительного института 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. Подхомутова*

**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](mailto:vestniktech@vogu35.ru)

**ISSN 2658-3399**

© ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет», 2020

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**

SCHOLARLY JOURNAL

First published in 2018

**No. 1 (7) / 2020**

SERIES: TECHNICAL SCIENCIES

VOLOGDA  
2020

No. 1 (7) / 2020 / APRIL. It is issued 4 times a year.

Scholarly 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](http://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, Director of Civil Engineering Institute 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. Kiyanenko*, 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),

*L.E. Shashkova*, Candidate of Engineering, Deputy Director of Civil Engineering Institute 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. Mikhaylyuk*, 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](mailto:vestniktech@vogu35.ru)

## Содержание

### МАШИНОВЕДЕНИЕ, СИСТЕМЫ ПРИВОДОВ И ДЕТАЛИ МАШИН

<i>Аваев А.А.</i> УТОЧНЕННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ВУЛКАНИЗАЦИИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТКАНЕВОЙ ОСНОВЕ .....	7
<i>Бормосов Н.А., Белоусова В.П., Втулкин А.А.</i> ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПЛОСКОФАКЕЛЬНЫХ ФОРСУНОК .....	11
<i>Колпаков В.Н.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ГИДРОПРИВОДА МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО СТАНКА С ЦЕНТРАЛИЗОВАННЫМ ИСТОЧНИКОМ ПИТАНИЯ.....	16
<i>Куницкий В.А.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ДЛЯ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛОЙ ЭНЕРГИИ СТОЧНОЙ ДУШЕВОЙ ВОДЫ.....	19
<i>Никифоров В.Е., Никитин Л.А.</i> РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ВАКУУМНОЙ СУШКИ ПРЕССОВАННЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	23
<i>Попов И.П.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ. ЧАСТЬ 2 .....	27

### ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

<i>Бакаев В.Н.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ФАЗЗИ-РЕГУЛЯТОРОМ.....	33
<i>Кудряшов Д.А., Суконщиков А.А.</i> РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ СОРТИРОВКИ ПИЛОМАТЕРИАЛА .....	36
<i>Лукин К.С., Курилова Н.В.</i> ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ОРГАНИЗАЦИИ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ .....	39
<i>Сорокин А.Н.</i> РАЗРАБОТКА WEB-СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ АППАРАТА АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ G-СЕТЕЙ ПЕТРИ.....	44
<i>Стариков Л.К., Сорокин А.Н.</i> РАСЧЁТ РАСХОДА ТОПЛИВА АВТОМОБИЛЯ ПО ИНФОРМАЦИИ СИСТЕМЫ САМОДИАГНОСТИРОВАНИЯ .....	47
<i>Швецов А.Н., Дианов С.В.</i> ИНТЕГРАЦИЯ АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ С ГЕОИНФОРМАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ.....	49

### СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<i>Булат А.Д., Филенков В.М., Обрубов В.А., Бобков Н.Л., Литовченко О.В.</i> ЭФФЕКТЫ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В ТЕХНОЛОГИИ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ .....	52
<i>Кузнецов Д.В., Поварова О.А.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛЬНЯНОЙ КОСТРЫ КАК СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЛИТНОГО УТЕПЛИТЕЛЯ.....	57
<i>Михалевич Н.В., Шахова Е.Н.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ .....	61
<i>Огородов Л.И., Шапкина В.А.</i> ПОВРЕЖДЕННОСТЬ СТАЛИ 45 ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ МЯГКОГО МАЛОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ.....	65
<i>Попов И.П.</i> ПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ ПРИ СОРТИРОВКЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ.....	70
<i>Тянин А.Н.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛАГООТДАЧИ ОСАДКА ПОСЛЕ ЗАМОРАЖИВАНИЯ.....	73
<i>Сведения об авторах</i> .....	78

## CONTENTS

### MACHINING, DRIVE SYSTEMS AND MACHINE PARTS

<i>Avaev A.A.</i> REFINED MODEL OF THE PROCESS OF THERMAL VULCANIZATION OF ELASTOMERIC COATINGS ON FABRIC BASIS .....	7
<i>Bormosov N.A., Belousova V.P., Vtulkin A.A.</i> EXPRESS-METHOD OF FLAT-PLATE NOZZLES HEAT TRANSFER DETERMINATION .....	11
<i>Kolpakov V.N.</i> STUDY OF HYDRAULIC DRIVE DYNAMICS OF METAL-CUTTING MACHINE WITH CENTRALIZED POWER SUPPLY .....	16
<i>Kunitsky V.A.</i> USE OF HEAT EXCHANGE UNIT FOR RECOVERY OF WASTE SHOWER WATER HEAT ENERGY .....	19
<i>Nikiforov V.E., Nikitin L.A.</i> DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL INSTALLATION FOR VACUUM DRYING OF COMPRESSED VEGETABLE MATERIALS .....	23
<i>Popov I.P.</i> STUDY OF FORCED OSCILLATIONS OF MECHANICAL SYSTEMS. PART 2 .....	27

### COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

<i>Bakaev V.N.</i> MODELLING OF CONTROL SYSTEM OF ELECTRIC DRIVE WITH FUZZY REGULATOR.....	33
<i>Kudryashov D.A., Sukonshchikov A.A.</i> DEVELOPMENT OF AUTOMATED TIMBER GRADING SYSTEM.....	36
<i>Lukin K.S., Kurilova N.V.</i> INFORMATION AND ANALYTICAL APPROACHES TO SOLVE PROBLEMS OF ROAD SAFETY ORGANIZATION .....	39
<i>Sorokin A.N.</i> DEVELOPMENT OF WEB-SYSTEM FOR BUILDING MODELS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES BUSINESS PROCESSES BASED ON THE DEVICE OF AGENT-ORIENTED G-PETRI NETS.....	44
<i>Starikov L.K., Sorokin A.N.</i> CALCULATION OF CAR FUEL CONSUMPTION BY INFORMATION OF THE SELF-DIAGNOSTIC SYSTEM .....	47
<i>Shvetsov A.N., Dianov S.V.</i> INTEGRATION OF AGENT-ORIENTED MODELS WITH GEOINFORMATION SYSTEMS .....	49

### CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

<i>Bulat A.D., Filenkov V.M., Obrubov V.A., Bobkov N.L., Litovchenko O.V.</i> EFFECTS OF ATMOSPHERIC ELECTRICITY IN DECONTAMINATION TECHNOLOGY .....	52
<i>Kuznetsov D.V., Povarova O.A.</i> USE OF FLAX SHIVE AS RAW MATERIAL FOR PLATE THERMAL INSULATOR PRODUCTION .....	57
<i>Mikhalevich N.V., Shakhova E.N.</i> DETERMINATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES STRENGTH IN LONG-TERM OPERATION CONDITIONS .....	61
<i>Ogorodov L.I., Shapkina V.A.</i> DAMAGE TO STEEL 45 IN NON-STATIONARY MODES OF SOFT LOW-CYCLE LOADING .....	65
<i>Popov I.P.</i> PRODUCTION CAPACITY WHEN SORTING BULK MATERIALS .....	70
<i>Tyanin A.N.</i> RESEARCH OF SEDIMENT MOISTURE-YIELDING ABILITY AFTER FREEZING ...	73
<i>Information about the authors</i> .....	78



## УТОЧНЕННАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ВУЛКАНИЗАЦИИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ТКАНЕВОЙ ОСНОВЕ

Одномерные математические модели нестационарной теплопроводности не всегда адекватно описывают сложные технологические процессы. К ним можно отнести процесс вулканизации покрытий из эластомера на тканевой основе. Дело в том, что в этом случае следует учитывать различные условия теплообмена через взаимно перпендикулярные плоскости исследуемого объекта. Это приводит к необходимости исследовать двухмерную модель теплопроводности. В данной работе рассматривается случай, когда теплообмен через такие плоскости происходит по закону Ньютона, но при различных значениях коэффициента теплоотдачи. В частности, подобная ситуация имеет место в вулканизационных аппаратах непрерывного действия с псевдооживленным слоем инертного зернистого теплоносителя.

Математическая модель, нестационарная теплопроводность, теплообмен, закон Ньютона, коэффициент теплоотдачи, аппарат непрерывного действия, псевдооживленный слой инертного зернистого теплоносителя.

Объектом исследования является полотно из ткани шириной  $2L$  с нанесенным на нее слоем эластомера (1) (на рис. 1 выделены серым цветом). Толщина системы ткань-эластомер составляет  $2l$ , при этом  $l$  намного меньше  $L$ . Полотно движется снизу вверх, проходя через диффузор (2) и поступая в реакционную камеру (4) с псевдооживленным слоем инертного зернистого теплоносителя (3), где сначала происходит прогрев системы ткань-эластомер, а затем процесс термической вулканизации эластомера. Ожижающим агентом при этом является нагретый воздух, который

вдувается в реакционную камеру и создает эффект псевдооживления. С помощью специальных устройств создается так называемый организованный псевдооживленный слой, который обеспечивает равномерный теплообмен по всей ширине полотна и предотвращает как высыпание псевдооживленного слоя из аппарата, так и его вынос вверх из реакционной камеры. Теплообмен через торцевую часть системы ткань-эластомер отличен от теплообмена через основную поверхность системы.

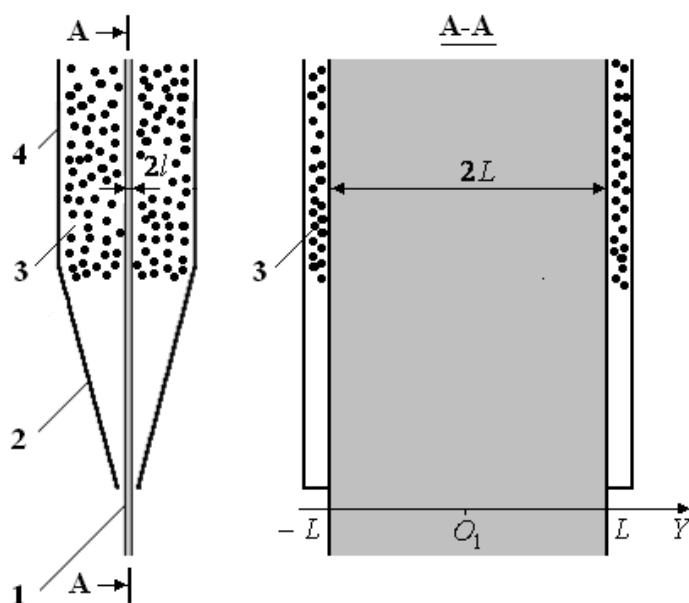


Рис. 1. Принципиальная схема вулканизационного аппарата: 1 – ткань с нанесенным на нее слоем эластомера; 2 – диффузор; 3 – псевдооживленный слой инертного зернистого теплоносителя; 4 – реакционная камера

Экспериментально доказано [1], что система ткань-эластомер за счет проникновения эластомера в основу ткани обладает практически одинаковыми теплофизическими свойствами, что позволяет считать ее однородной и, следовательно, симметричной относительно плоскости  $x=0$  (рис. 2).

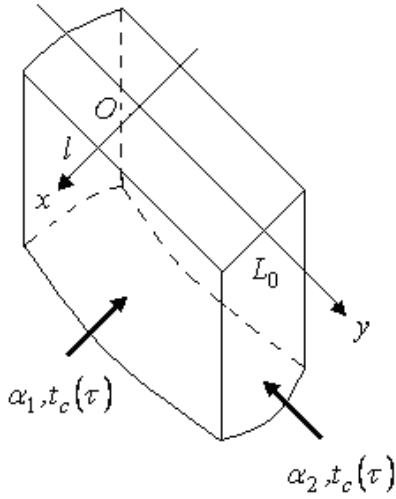


Рис. 2. Схема теплообмена в системе координат  $xOy$

Таким образом, для описания внутреннего теплопереноса в системе ткань-эластомер в рассматриваемом случае следует использовать двухмерное уравнение теплопроводности [2]

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

$$(0 \leq x < l; 0 \leq Y < L),$$

где  $t(x, Y, \tau), ^\circ\text{C}$  – температура в точке с координатами  $x, Y$  системы ткань-эластомер в момент времени  $\tau, \text{с}$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности системы,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $w(x, Y, \tau)$  – приведенная мощность источника (стока) тепла,  $^\circ\text{C}/\text{с}$ .

В рассматриваемой ситуации (рис. 1) для решения уравнения (1) нужно использовать следующие краевые условия:

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

$$\frac{\partial t(l, Y, \tau)}{\partial x} = \frac{\alpha_1}{\lambda} [t_c(\tau) - t(l, Y, \tau)]; \quad (3)$$

$$\frac{\partial t(0, Y, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial t(x, L, \tau)}{\partial Y} = \frac{\alpha_2}{\lambda} [t_c(\tau) - t(x, L, \tau)]; \quad (5)$$

$$\frac{\partial t(x, 0, \tau)}{\partial Y} = 0, \quad (6)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи от внешней среды (псевдооживленного слоя) к плоскостям  $x=l$  и  $Y=L$  соответственно,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \times ^\circ\text{C})$ ;  $t_c(\tau)$  – температура внешней среды,  $^\circ\text{C}$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности системы ткань-эластомер,  $\text{Вт}/(\text{м} \times ^\circ\text{C})$ . Очевидно, что в данном случае  $\alpha_2 < \alpha_1$ .

Условие (2) является начальным. Так как в правой части этого условия присутствует функция  $f(x, Y)$  общего вида, то такое условие позволяет использо-

вать метод кусочно-постоянных значений параметров внутреннего и внешнего переноса тепла [3].

Условия (3) и (5) являются краевыми условиями третьего рода, что соответствует закону Ньютона внешнего теплообмена.

Условия (4) и (6) отвечают отсутствию потока тепла через плоскости  $x=0$  и  $Y=0$  соответственно.

Оптимальным методом аналитического решения поставленной задачи является метод конечных интегральных преобразований [4]. Но в связи с этим возникает следующая проблема: значение размера  $L$  слишком велико (оно составляет порядка 0,5 м), что для обеспечения необходимой точности вычислений требует использовать в решении данной задачи слишком большое число членов ряда Фурье по координате  $Y$ .

Эту проблему можно решить, учитывая низкую теплопроводность системы ткань-эластомер, используя систему координат  $xOy$  (рис. 2), заменив размер  $L$  на  $L_0$ , который был бы относительно малым по величине и в то же время практически обеспечивал отсутствие переноса тепла через плоскость  $y=0$ .

Для выбора размера  $L_0$  предлагается использовать решение одномерного уравнения теплопроводности для полуограниченного тела, когда координата  $y$  может изменяться в соответствии с двойным неравенством  $-\infty < y < L_0$  [2]:

$$t_\infty(y, \tau) = t_0 + (t_c - t_0) \times \left[ \operatorname{erfc}\left(\frac{L_0 - y}{2\sqrt{a\tau}}\right) - \exp\left(\frac{\alpha_2 \cdot (L_0 - y)}{\lambda} + \frac{\alpha_2^2 a \tau}{\lambda^2}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{\alpha_2 \sqrt{a\tau}}{\lambda} + \frac{L_0 - y}{2\sqrt{a\tau}}\right) \right]. \quad (7)$$

Решению (7) соответствуют граничные условия:

$$\frac{\partial t_\infty(L_0, \tau)}{\partial y} = \frac{\alpha_2}{\lambda} [t_c - t_\infty(L_0, \tau)];$$

$$\frac{\partial t_\infty(-\infty, \tau)}{\partial y} = 0.$$

В записи решения (7) использовано упрощенное начальное условие  $t_\infty(y, 0) = t_0 = \text{const}$  и независящее от времени значение  $t_c$  температуры внешней среды.

Решение (7) определяется двумя параметрами: задаваемым значением времени  $\tau$  и вычисляемым при этом значением  $L_0$ .

Оптимальное значение  $L_0$  можно получить из сравнения решения (7) с решением, представленным следующим выражением [3]:

$$T(y, \tau) = t_c(\tau) + \frac{2}{L_0} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ p(v_n, \tau) + \frac{(-1)^n L_0 B i_2 t_c(\tau)}{v_n \sqrt{v_n^2 + B i_2^2}} \right] \frac{(v_n^2 + B i_2^2) \cos\left(v_n \frac{y}{L_0}\right)}{v_n^2 + B i_2^2 + B i_2}, \quad (8)$$

где  $B i_2 = \alpha_2 L_0 / \lambda$  – критерий Био;  $v_n > 0$  – корни характеристического уравнения  $ctgv = v/Bi_2$ ;

$$p(v_n, \tau) = \frac{a}{L_0} B i_2 \cos v_n \int_0^\tau t_c(\omega) e^{-a \left(\frac{v_n}{L_0}\right)^2 (\tau - \omega)} d\omega +$$

$$\left[ \int_0^{L_0} f(y) \cos\left(v_n \frac{y}{L_0}\right) dy \right] e^{-a \left(\frac{v_n}{L_0}\right)^2 \tau}.$$

Решение (8) получено при использовании следующих краевых условий:

$$\begin{aligned} t(y,0) &= f(y); \\ \frac{\partial T(L_0,\tau)}{\partial x} &= \frac{\alpha_2}{\lambda} [t_c(\tau) - T(L_0,\tau)]; \\ \frac{\partial T(x,0,\tau)}{\partial y} &= 0. \end{aligned}$$

На рисунке 3 представлены графики расчетных зависимостей, полученные в соответствии с решениями (7) и (8). Решению (7) соответствует сплошная линия, а решению (8) – кружочки с крестиками внутри. Расчеты проводились для эластомера марки 533 при следующих значениях параметров:  $\tau=10$  с;  $L_0=0,1$  м;  $t_c(\tau)=t_c=100$  °C;  $\alpha_2=50$  Вт/(м<sup>2</sup>×°C). Максимальная абсолютная погрешность вычислений при этом составляла не более 0,004 °C, что свидетельствует о приемлемом выборе значения  $L_0$ .

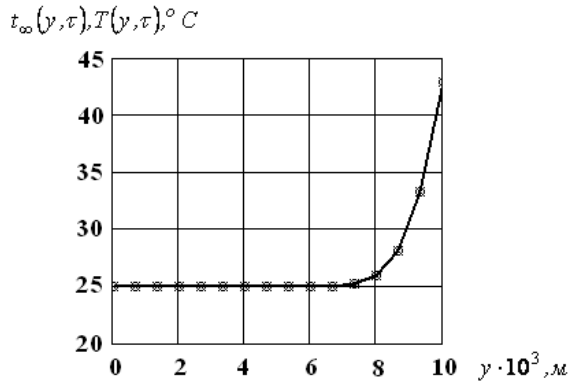


Рис. 3. Графическое представление результатов расчетов, произведенных в соответствии с решением (7) (сплошная линия) и решением (8) (кружочки с крестиками)

Решение уравнения

$$\frac{\partial W(x,y,\tau)}{\partial \tau} = a \left[ \frac{\partial^2 W(x,y,\tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W(x,y,\tau)}{\partial y^2} \right] + w(x,y,\tau) \quad (9)$$

$(0 \leq x < l; 0 \leq y < L_0)$

для краевых условий:

$$\begin{aligned} W(x,y,0) &= f(x,y); \\ \frac{\partial W(l,y,\tau)}{\partial x} &= \frac{\alpha_1}{\lambda} [t_c(\tau) - W(l,y,\tau)]; \\ \frac{\partial W(0,y,\tau)}{\partial x} &= 0; \\ \frac{\partial W(x,L_0,\tau)}{\partial y} &= \frac{\alpha_2}{\lambda} [t_c(\tau) - W(x,L_0,\tau)]; \\ \frac{\partial W(x,0,\tau)}{\partial y} &= 0 \end{aligned}$$

выполнено с помощью метода конечных интегральных преобразований при улучшении сходимости рядов Фурье и может быть представлено в виде

$$\begin{aligned} W(x,y,\tau) &= t_c(\tau) + \\ + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \frac{S(\mu_m,y,\tau)}{l} - \frac{(-1)^{m+1} Bi_1 t_c(\tau)}{\mu_m \sqrt{\mu_m^2 + Bi_1^2}} \right] \frac{\mu_m^2 + Bi_1^2}{\mu_m^2 + Bi_1^2 + Bi_1} \cos\left(\mu_m \frac{x}{l}\right), \quad (10) \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} S(\mu_m,y,\tau) &= t_c(\tau) \varphi(\mu_m) + \\ + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{P(\mu_m, \nu_n, \tau)}{L} - \frac{\varphi(\mu_m) (-1)^{n+1} Bi_2 t_c(\tau)}{\nu_n \sqrt{\nu_n^2 + Bi_2^2}} \right] \frac{(\nu_n^2 + Bi_2^2)}{\nu_n^2 + Bi_2^2 + Bi_2} \cos\left(\nu_n \frac{y}{L_0}\right); \\ \varphi(\mu_m) &= \frac{l \cdot \sin \mu_m}{\mu_m}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(\mu_m, \nu_n, \tau) &= \\ = \int_0^{\tau} B(\mu_m, \nu_n, \omega) \exp(-A(\mu_m, \nu_n)(\tau - \omega)) d\omega + \\ + C(\mu_m, \nu_n) \exp(-A(\mu_m, \nu_n)\tau); \end{aligned}$$

$$A(\mu_m, \nu_n) = a \left[ \left( \frac{\mu_m}{l} \right)^2 + \left( \frac{\nu_n}{L} \right)^2 \right];$$

$$\begin{aligned} B(\mu_m, \nu_n, \tau) &= a t_c(\tau) \left( Bi_1 \frac{L_0}{l} \cos \mu_m \frac{\sin \nu_n}{\nu_n} + Bi_2 \frac{l}{L_0} \frac{\sin \mu_m}{\mu_m} \cos \nu_n \right) + \\ + \int_0^l \cos\left(\mu_m \frac{x}{l}\right) dx \int_0^{L_0} w(x,y,\tau) \cos\left(\nu_n \frac{y}{L_0}\right) dy; \\ C(\mu_m, \nu_n) &= \int_0^l \cos\left(\mu_m \frac{x}{l}\right) dx \int_0^{L_0} f(x,y) \cos\left(\nu_n \frac{y}{L_0}\right) dy; \end{aligned}$$

$Bi_1 = \alpha_1 l / \lambda$  – критерий Био;  $\mu_m > 0$  – корни характеристического уравнения  $ctg \mu = \mu / Bi_1$ .

На рисунке 4 представлены результаты расчетов, выполненных на основании решения (10) при значениях коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_1=100$  Вт/(м<sup>2</sup>×°C),  $\alpha_0=50$  Вт/(м<sup>2</sup>×°C); размерах  $l=0,005$  м,  $L_0=0,01$  м; времени  $\tau=10$  с.

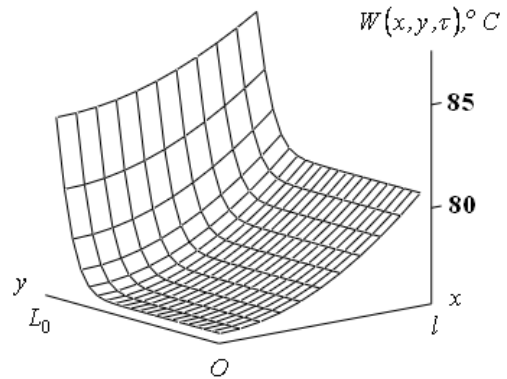


Рис. 4. Графическое представление результатов расчетов, выполненных на основании решения (10) уравнения (9)

Предложенная двухмерная модель теплопроводности в системе ткань-эластомер позволяет производить уточненные расчеты значений температуры в различных точках системы и прогнозировать качество изделия, подвергаемого термической вулканизации в аппаратах рассматриваемого типа.

### Литература

1. Гвоздев, В. Д. К вопросу о коэффициентах тепло- и температуропроводности ткани в системе ткань-эластомер / В. Д. Гвоздев, А. А. Аваев // Теоретические основы химической технологии – 1980. – Том XIV, № 1. – С. 127–128.

2. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – Москва : Высшая школа, 1967. – 600 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.

4. Карташов, Э. М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э. М. Карташов. – Москва : Высшая школа, 1985. – 480 с.

*A.A. Avaev*

### REFINED MODEL OF THE PROCESS OF THERMAL VULCANIZATION OF ELASTOMERIC COATINGS ON A FABRIC BASIS

One-dimensional mathematical models of unsteady heat conduction do not always adequately describe complex technological processes. These processes include the vulcanization process of fabric-based elastomeric coatings. The fact is that in this case, various heat transfer conditions should be taken into account through mutually perpendicular planes of the object under study. This leads to the need to study a two-dimensional model of thermal conductivity. In this paper, we consider the case when heat transfer through such planes occurs according to Newton's law, but at different values of the heat transfer coefficient. In particular, a similar situation takes place in continuous curing fluidized bed apparatus with an inert grainy heat-transfer agent.

Mathematical model, non-stationary heat conduction, heat transfer, Newton's law, heat transfer coefficient, continuous apparatus, fluidized bed of an inert grainy heat-transfer agent.



*Н.А. Бормосов, В.П. Белоусова, А.А. Втулкин*  
Вологодский государственный университет

### ЭКСПРЕСС-МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОБМЕНА ПЛОСКОФАКЕЛЬНЫХ ФОРСУНОК

В статье представлена методика оперативного контроля теплообменных характеристик плоскофакельных форсунок с применением эффекта рассеивания света. Произведено тарирование системы контроля форсунок, применяемых в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок.

Форсунка, зона вторичного охлаждения, экспресс метод контроля, тарировка, теплообмен.

Одним из актуальных направлений исследований в области промышленной теплотехники являются исследования тепловых и теплообменных процессов, протекающих в затвердевающем металле и элементах оборудования технологических машин, например в зоне вторичного охлаждения машин непрерывного литья заготовок (ЗВО МНЛЗ).

До 50 % тепла, отводимого от непрерывно тянувшегося слитка в пределах МНЛЗ, приходится на зону вторичного охлаждения. Тепловые процессы определяют надежность, производительность технологического оборудования и качество получаемых заготовок. Все это диктует выбор рациональной конструк-

ции и оптимальных режимов системы охлаждения затвердевающего металла. Интенсивность и равномерность теплоотвода при охлаждении металла зависит от качества работы установленных форсунок (степени дисперсности распыления жидкости).

Широкое распространение получили системы водяного форсуночного охлаждения ЗВО МНЛЗ. Это обусловлено незначительной стоимостью и низкими энергетическими затратами, а также высокой удельной теплоемкостью воды по сравнению с другими охладителями. На рисунке 1 показан процесс формирования факела диспергированной жидкости при работе плоскофакельной форсунки.

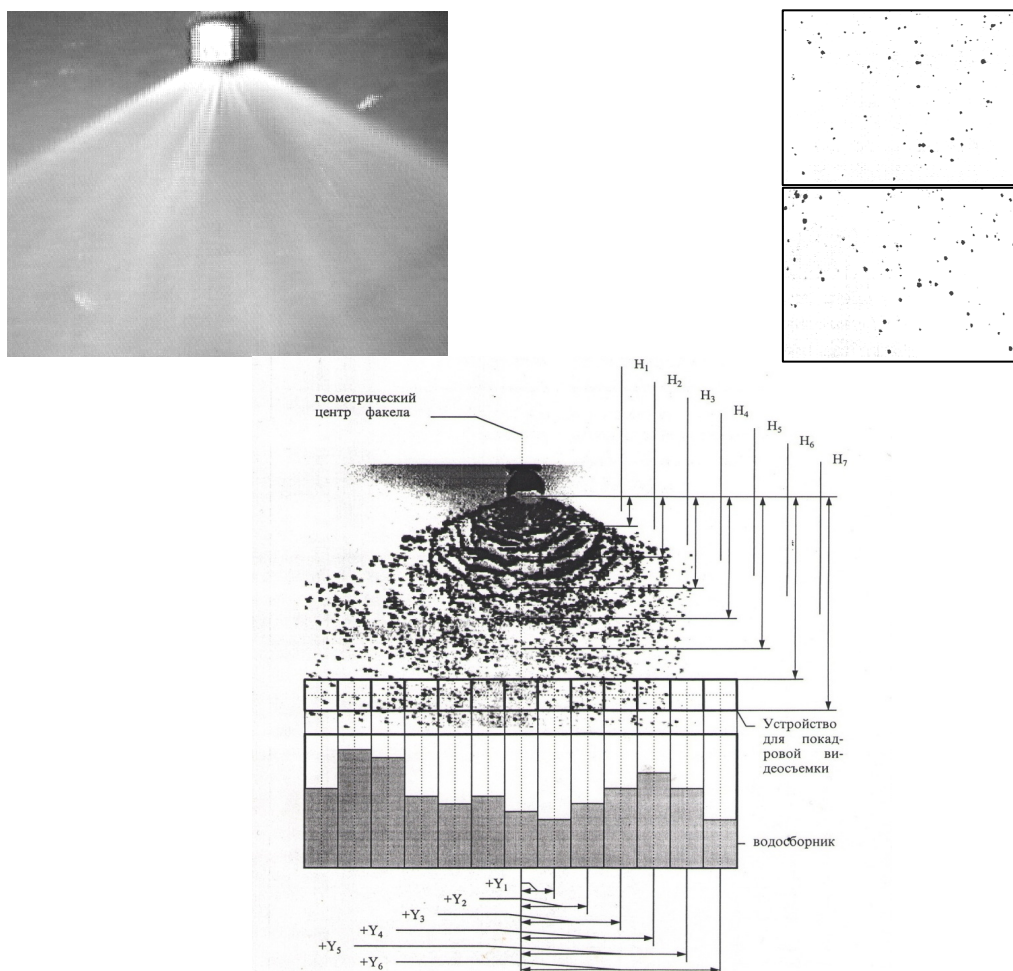


Рис. 1. Факел диспергированной жидкости при работе плоскофакельной форсунки

При обобщении результатов исследований теплообмена при форсуночном охлаждении высокотемпературных поверхностей обнаруживается существенная зависимость интенсивности теплообмена от следующих факторов [2]:

- типов форсунок и их геометрических характеристик (например, площадь выходного отверстия и его конструкция, формирующие соответствующий факел охлаждающей среды);

- режимов охлаждения (давление воды и воздуха перед форсункой, высота установки над поверхностью и т.д.);

- качество работы форсунки (степень диспергированности или мелкость распыления рабочей жидкости).

Все это существенно затрудняет анализ известных данных и их обобщение. Результаты, полученные при исследовании конкретных форсунок, не представляется возможным применить к другим условиям охлаждения, что существенно ограничивает применение известных методик в производственных условиях, для оперативной настройки системы и контроля качества

работы форсунок, прогнозирования качества выпускаемой продукции и повышения надежности эксплуатации оборудования технологических машин.

Для оперативного контроля (экспресс-анализа) диспергирующих свойств форсунок удобным и перспективным является способ, основанный на измерении интенсивности рассеянного света при пропускании луча лазера через факел форсунки (рис. 2). Интенсивность рассеянного света прямо пропорциональна площади поверхности распыленной жидкости, и эту площадь можно рассматривать как обобщенный параметр диспергированности [2].

Для того чтобы использовать метод экспресс-анализа диспергирующих свойств форсунок, необходимо произвести настройку и тарировку измерительной системы [1, 2]. При тарировке определяется коэффициент пропорциональности между амплитудой сигнала, пропорционального интенсивности рассеянного света в данном месте факела, и обобщенным параметром диспергированности в том же месте факела.

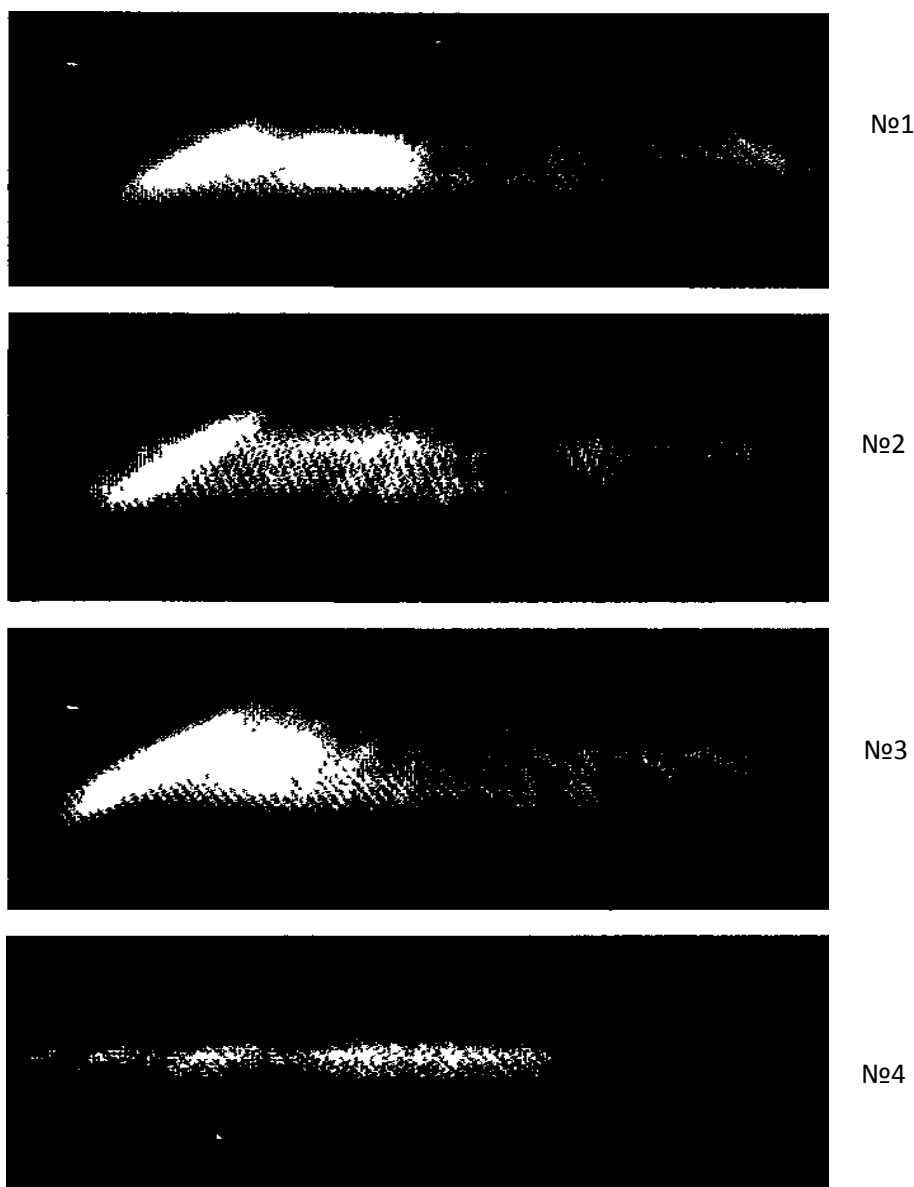


Рис. 2. Свет, рассеянный на каплях диспергированной жидкости

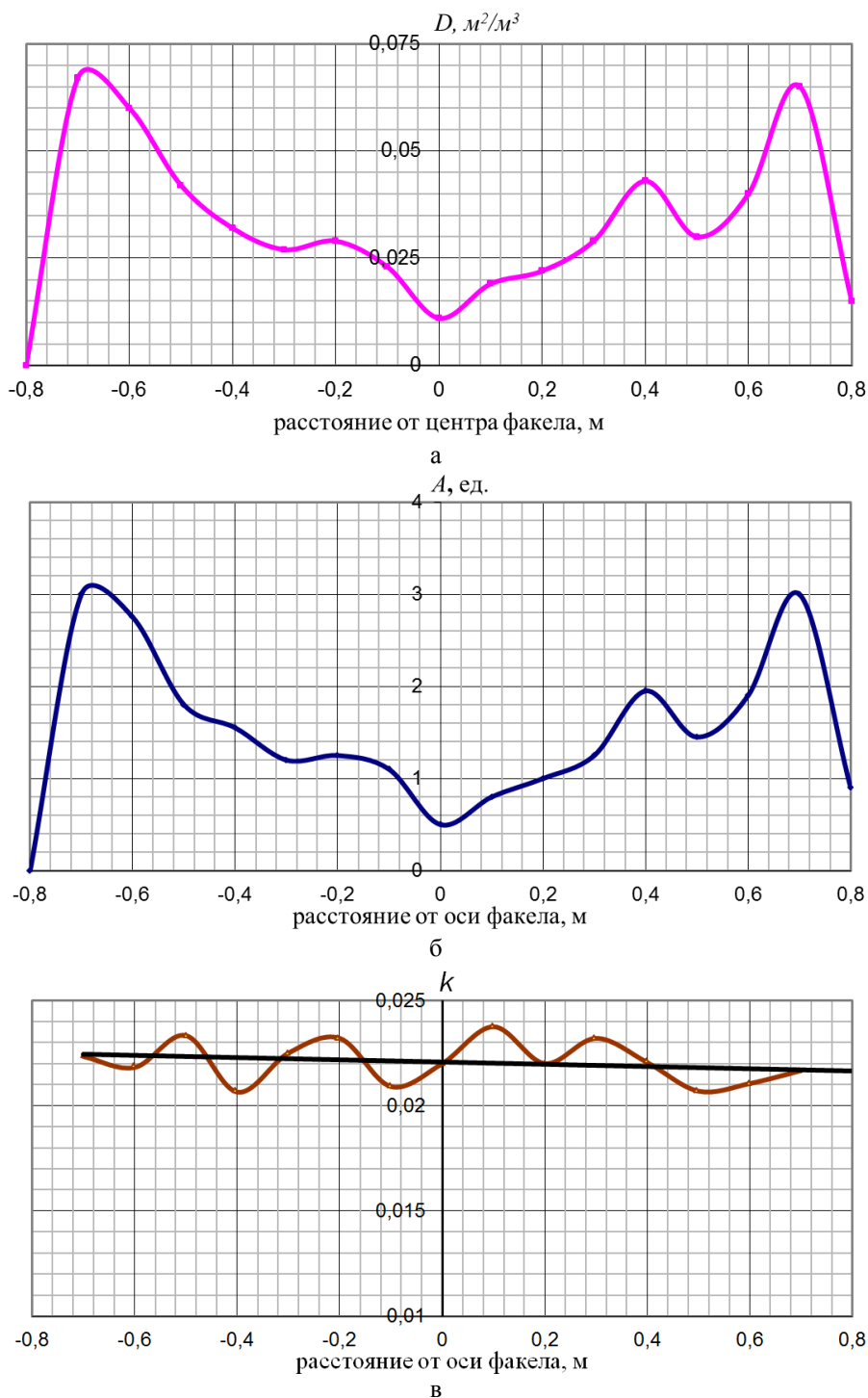


Рис. 3. Тарировка системы: а) распределение обобщенного параметра диспергированности по ширине факела; б) распределение амплитуды сигнала рассеянного света по ширине факела; в) тарировочный коэффициент

Тарировку системы и настройку следует производить с помощью форсунки, диспергирующие свойства которой исследованы независимым способом, например высокоскоростной видеосъемкой [2]. Так, несмещенное изображение летящих капель можно получить, используя режим высокоскоростного затвора видеоустройства при видеосъемке с экспозицией кадра  $1,25 \times 10^{-4}$  с. После того как для тарировочной плоскофакельной форсунки в локальных участках факела на одной и той же высоте определен обобщенный параметр диспергированности капель

$$D = N \cdot R_{32}^2,$$

строится зависимость  $D(\theta)$ , где угол  $\theta$  равен углу между направлением луча лазера и направлением от локального участка факела к приемнику рассеянного света. После этого, на той же высоте факела пропускается луч лазера и производится съемка рассеянного света. Амплитуда сигнала рассеянного света, полученного при компьютерной обработке, также будет зависеть от угла  $\theta$ :  $A(\theta)$ . Следующим шагом рассчитывается тарировочный коэффициент  $k$ :

$$k(\theta) = \frac{D(\theta)}{A(\theta)}.$$

Очевидно, что тарировочный коэффициент  $k(\theta)$  будет зависеть от расстояния между факелом и приемником света, от чувствительности приемника света, а также от компьютерной программы, обрабатывающей видеосигнал.

После определения тарировочного коэффициента применяется метод экспресс-анализа для определения обобщенного параметра диспергированности в любом месте факела произвольной форсунки, подлежащей исследованию. При этом следует сохранять геометрию расположения приемника света, луча лазера и плоскости факела. Луч лазера можно перемещать в плоскости факела, соответственно должен перемещаться приемник света, иначе тарировочный коэффициент изменится. В экспресс-методе факел опытной плоскофакельной форсунки, подлежащей исследованию, просвечивается лучом лазера. Приемник света воспринимает свет, рассеянный каплями жидкости, преобразует его в электрические сигналы, которые изображаются в виде распределения амплитуды сигнала рассеянного света, причем амплитуда характеризуется углом рассеивания  $\theta$ . Далее рассчитывается обобщенный параметр диспергированности в зависимости от угла рассеивания:

$$D(\theta) = k(\theta) \cdot A(\theta).$$

Зная геометрию расположения приемника и факела, легко определить локальный участок факела, соответствующий углу  $\theta$ .

На рисунке 3а показано распределение обобщенного параметра диспергированности  $D$  по ширине факела, полученное способом, изложенным в работах [1, 2]. На рисунке 3б показано распределение амплитуды сигнала рассеянного света по ширине факела, полученное при просвечивании факела на том же уровне лучом лазера. На рисунке 3в показан тарировочный коэффициент, равный отношению  $D$  к  $A$ .

Для оценки коэффициента теплоотдачи на охлаждаемой поверхности можно использовать формулу [3]

$$\alpha = 5200 \cdot N \cdot R_{32}^2 \cdot \frac{G}{F_{\phi} \sqrt{Y^2 + H^2}},$$

где  $G$  – полный объемный расход воды форсунки,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$F_{\phi}$  – площадь отверстия форсунки,  $\text{м}^2$ ;

$H$  – высота от среза сопла до исследуемого сечения (охлаждаемой поверхности), м;

$Y$  – координата от оси факела до точки в исследуемом сечении струи, м.

Данная формула является эмпирической, ее вывод основан на том, что интенсивность теплообмена распыленной жидкости с высокотемпературной поверхностью должна быть пропорциональна площади поверхности жидкости, в единицу времени взаимодействующей с высокотемпературной поверхностью.

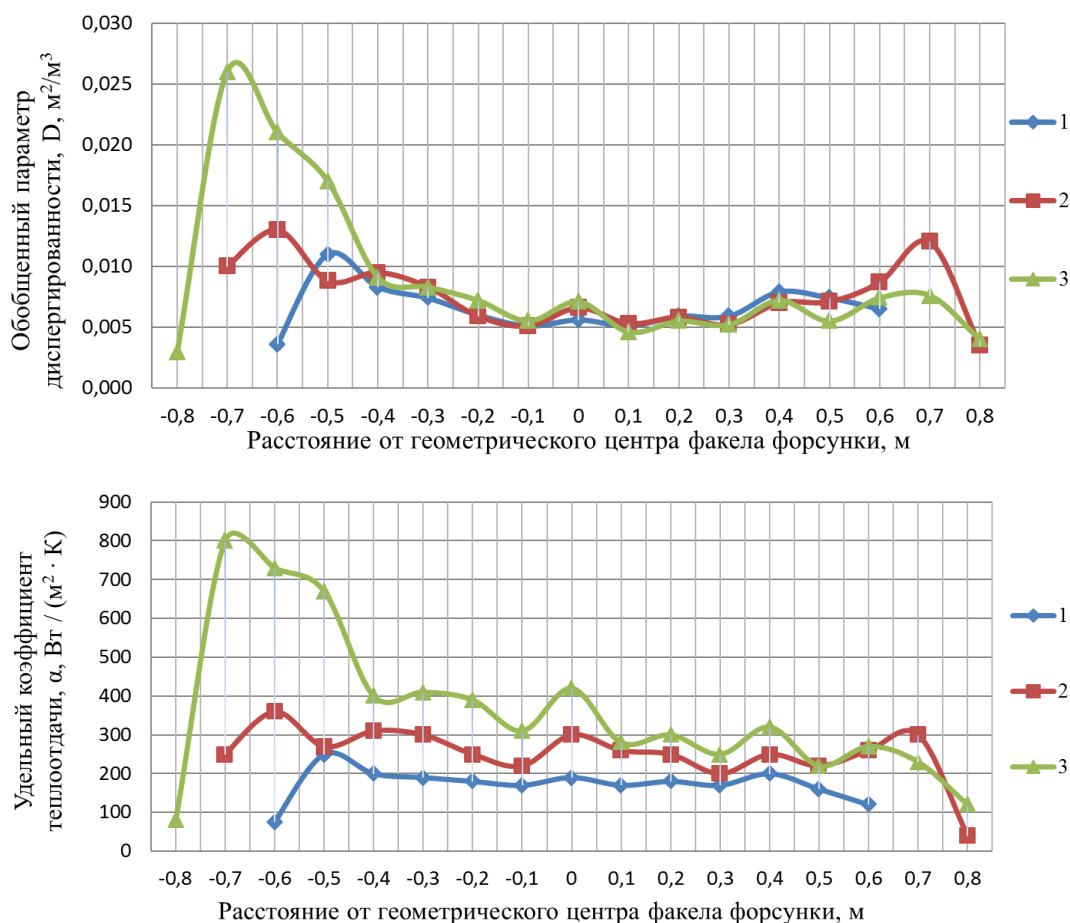


Рис. 4. Распределение обобщенного параметра диспергированности и удельного коэффициента теплоотдачи плоскофакельной форсунки по ширине факела на высоте от поверхности установки 0,45 м (1 – 0,05 МПа, 2 – 0,15 МПа, 3 – 0,25 МПа)

На рисунке 4 показано распределение обобщенного параметра диспергированности и удельного коэффициента теплоотдачи плоскофакельной форсунки по ширине факела на высоте от поверхности установки 0,45 м.

Таким образом, используя изложенный метод экспресс-анализа, можно оперативно оценивать теплообменные характеристики плоскофакельных форсунок.

#### **Литература**

1. Шичков, А. Н. Управление вторичным охлаждением машин непрерывного литья стали / А. Н. Шич-

ков, Н. А. Бормосов, В. П. Белоусова. – DOI: 10.18721/JEST.240209 // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. – 2018. – Т. 24, № 2. – С. 104–118.

2. Калягин, Ю. А. Тепловые процессы в зоне вторичного охлаждения машины непрерывного литья заготовок : монография / Ю. А. Калягин, Н. А. Бормосов, С. В. Лукин. – Череповец : ЧГУ, 2005. – 168 с.

3. Методика исследования теплообмена одиночных капель с высокотемпературной поверхностью металла / Ю. А. Калягин, Н. А. Бормосов, С. Ю. Якуничев [и др.] // Вестник Уральского государственного технического университета. – 2003. – № 5. – С. 70–72.

*N.A. Bormosov, V.P. Belousova, A.A. Vtulkin*

#### **EXPRESS-METHOD OF FLAT-PLATE NOZZLES HEAT TRANSFER DETERMINATION**

The article presents the method of operational control of heat exchange characteristics of flat-plate injectors using the effect of light scattering. Calibration of the control system of injectors used in the zone of secondary cooling of the continuous casting machine was performed.

Spray nozzle, the secondary cooling zone, express-method of control, calibration, heat transfer.



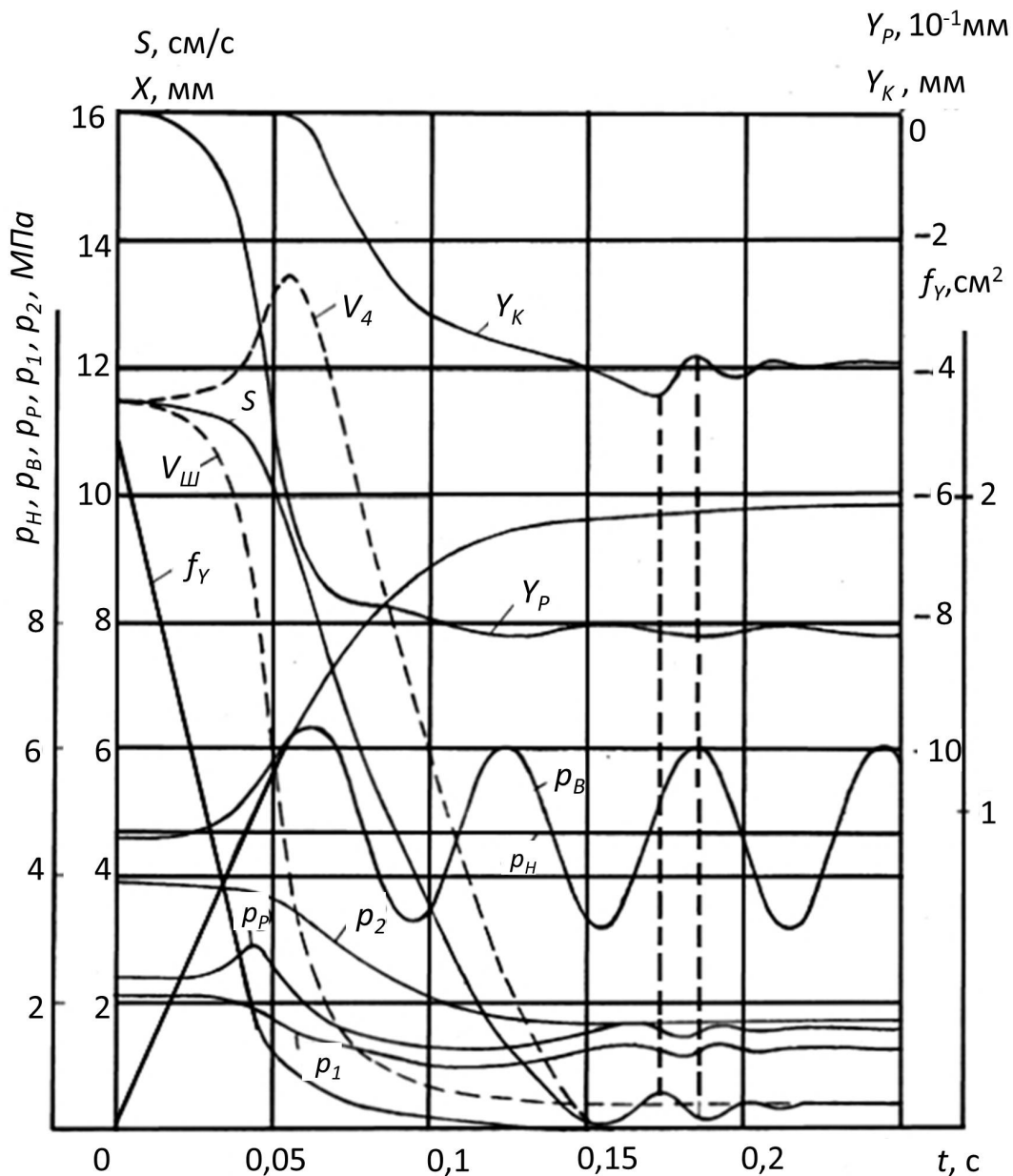


Рис. 2. Диаграмма переходного процесса БП – РП

Уравнение равновесия статора насоса [2]:

$$m_c \cdot \frac{d^2 y_c}{dt^2} = K_H \cdot p_H - e_{нн}(\Delta_H + h_H + y_c) - r_H \cdot \frac{dy_c}{dt},$$

где  $m_c$  – масса статора;  $y_c$  – перемещение статора;  $K_H$  – коэффициент пропорциональности, определяющий силу, создаваемую давлением жидкости;  $p_H$  – сжатие пружины при максимальном эксцентриситете;  $h_H$  – смещение статора от положения максимального эксцентриситета при БП;  $r_H$  – коэффициент вязкого трения деталей насоса.

Величина эксцентриситета:

$$h = h_0 - h_H - y_c,$$

где  $h_0$  – максимальное значение эксцентриситета.

Подача насоса

$$Q_H = Q_{H0} \cdot \frac{E_H}{E_{H0}},$$

где  $Q_{H0}$  – подача насоса при максимальном эксцентриситете.

Изменение давления и расхода жидкости в трубопроводе не происходит одновременно во всех сечениях, а распространяется по нему в виде упругих волн. При близких значениях фазы ударной волны и длительности переходного процесса исследование должно производиться на основе волновой теории [1]. Пренебрегая изменениями скоростного и геометрического напора, а также потерями от вязкого трения и полагая, что начало координаты  $\xi_H$  ( $\xi_H=0$ ) расположено на конце трубопровода, примыкающем к насосной установке, для начала трубопровода получаем:

$$\varphi_H \cdot (-a_y \cdot t) = \frac{1}{\rho \cdot a_y} \cdot (p_H - p_{H0}) - \psi_H \cdot (a_y \cdot t),$$

$$U_T = S_{БП} + \frac{F_T}{F_{Ш}} \cdot [\varphi_H \cdot (-a_y \cdot t) - \psi_H \cdot (a_y \cdot t)],$$

где  $\varphi_H$  и  $\psi_H$  – произвольные функции;  $a_y$  – скорость распространения ударной волны;  $p_{H0}$  – начальное значение давления в начале трубопровода;  $F_T$  – площадь поперечного сечения трубопровода.

Соответственно, для конца трубопровода ( $\xi_H = l_T$ , где  $l_T$  – длина напорного трубопровода) можно записать:

$$\psi_H \cdot (l_T + a_y \cdot t) = \frac{1}{\rho \cdot a_y} \cdot (p_B - p_{BO}) - \phi_{H \cdot (l_T - a_y \cdot t)},$$

$$U_{\text{ш}} = S_{\text{БП}} + \frac{F_T}{F_{\text{ш}}} \cdot [\phi_H \cdot (l_T - a_y \cdot t) - \psi_H \cdot (l_T - a_y \cdot t)],$$

где  $p_{BO}$  – начальное значение давления в конце трубопровода.

Полученные уравнения совместно с уравнениями, приведенными в работах [3, 4], а также уравнениями равновесия золотника клапана давления и расходов жидкости через дроссели составят математическую модель ГП с централизованным источником питания. Ввиду сложности полученных уравнений, решаем их численными методами.

На рисунке 2 приведена одна из диаграмм переходного процесса с БП на РП.

Проведенные экспериментальные исследования позволили подтвердить правильность теоретических выводов. Сопоставление расчетных и экспериментальных кривых свидетельствует о достаточно точном их совпадении. На большей части переходного процесса отклонение расчетных значений скорости от экспериментальной не превышает 10 %, давлений в полостях ГЦ и редуцированного давления – 6–8 %.

Периоды колебаний давления  $p_B$ , полученные расчетным и экспериментальным путем, практически совпадают (отклонения не превышают 6 %). Вместе с

тем, если в реальном приводе колебания давления  $p_B$  затухают, то амплитуда колебаний, полученных расчетным путем, остается постоянной. Это можно объяснить тем, что при расчете не учитывалось вязкое трение жидкости в напорном трубопроводе.

## Литература

1. Дрейшнер, Э. П. Динамика переходного процесса в гидрофицированных агрегатных станках / Э. П. Дрейшнер // Станки и инструмент. – 1973. – № 11. – С. 11–13.
2. Зайченко, И. З. Теория и расчет механики автоматического регулирования подачи пластинчатых насосов для гидроприводов машин / И. З. Зайченко, Л. М. Мышлевский, В. Н. Сегал // Вестник машиностроения, 1975. – № 9. – С. 15–19.
3. Колпаков, В. Н. Динамический синтез гидроустройства с регулятором и путевым управлением для переключения силового стола с быстрого подвода на рабочую подачу / В. Н. Колпаков // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1988. – № 4. – С. 135–140.
4. Колпаков, В. Н. Определение разброса координаты точки перехода гидрофицированного рабочего органа с быстрого подвода на рабочую подачу / В. Н. Колпаков // Вестник Вологодского государственного университета. – 2018. – № 1. – С. 14–17.
5. Свешников, В. К. Станочные гидроприводы : справочник / В. К. Свешников. – 5-е изд., перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 2008. – 640 с.

*V.N. Kolpakov*

## STUDY OF HYDRAULIC DRIVE DYNAMICS OF METAL-CUTTING MACHINE WITH THE CENTRALIZED POWER SUPPLY

A mathematical model of hydraulic drive of a metal-cutting machine with a centralized power supply, which takes into account the dynamic characteristics of an adjustable pump with automatic pressure control and a battery and waveprocesses in pipeline,s has been developed. The results of the calculation are presented in the form of a diagram.

Hydraulic drive, centralized power supply, buttery, mathematical model, prtssure, speed.



## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА ДЛЯ РЕКУПЕРАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ СТОЧНОЙ ДУШЕВОЙ ВОДЫ

В статье представлена информация о разработке способа рекуперации тепловой энергии воды, сливаемой из душевых устройств. В качестве такого способа выбрано использование теплообменного аппарата, спроектированного конкретно для данных условий и задач. Описан процесс расчета теплообменного аппарата, имеется его схематичное изображение. Теплообменный аппарат воплощен в физическом виде и экспериментально опробован. Представлены результаты эксперимента и основные формулы для расчёта характеристик теплообменного аппарата.

Теплообменный аппарат, утилизация теплоты, энергоэффективность, энергосбережение.

В России активно развивается сфера индивидуального жилищного строительства. Многие граждане делают выбор в пользу проживания в собственном доме, а не в многоквартирном. Но большая часть земельных участков, выбранных для строительства частных домов, находится относительно далеко от инженерных сетей, обеспечивающих население энергетическими ресурсами и коммунальными благами: газопроводов, централизованных систем водоснабжения и отопления. В данных условиях собственнику земельного участка приходится самостоятельно оплачивать подведение коммуникаций к земельному участку.

Электрическая энергия – это единственный энергоресурс, экономически и физически доступный в подобных ситуациях. В связи с этим появился запрос на решение задачи о проектировании дома, все инженерные сети которого будут потреблять в качестве энергоресурса только электрическую энергию. Для успешной работы по данной теме необходимо найти новые способы исполнения инженерных сетей внутри дома или модернизировать уже известные решения.

Предполагается, что в проектируемом доме вода, предназначенная для принятия душа, будет нагреваться в проточном электрическом водонагревателе. Необходимо найти способ максимально сократить потребление электрической энергии, идущей на нагрев воды при принятии душа. Как известно, горячая вода после принятия душа удаляется в канализацию, и теплота, которой вода обладает, никак не используется.

Поэтому актуальной задачей является разработка способа утилизации теплоты горячей воды, отводимой в канализацию от душевых установок. Целью данной статьи является разработка такого способа с целью экономии электрической энергии, идущей на нагрев воды для принятия душа.

Задачи работы:

- разработка и проектирование устройства для утилизации теплоты;

- создание устройства для утилизации теплоты;
- экспериментальное испытание устройства для утилизации теплоты;
- оптимизация устройства для утилизации теплоты.

В качестве способа утилизации теплоты предлагается использовать теплообменный аппарат (ТОА). Трудность в использовании заводских экземпляров ТОА заключается в том, что объёмы воды и специфика работы (канализационная вода удаляется безнапорным способом) не подходят ни к одному существующему образцу. В связи с этим обстоятельством необходимо разработать ТОА, подходящий для выполнения данной задачи.

Принципиальная схема душевой после модернизации представлена на рисунке 1, где 1 – теплообменный аппарат, 2 – электрический проточный водонагреватель, 3 – душ,  $t$  – температуры греющей и нагреваемой сред на входе в ТОА и на выходе из ТОА.

На основе анализа поставленной задачи были приняты следующие конструктивные решения при проектировании ТОА:

1. ТОА исполнить в виде закрытой ёмкости, включенной в канализационную сеть. Отверстия для входа и выхода канализационной воды расположить на одном высотном уровне. Расположить ёмкость горизонтально и предусмотреть люк для обслуживания ТОА в случае необходимости.

2. Внутри ТОА расположить участок трубы с водой, находящийся перед проточным электрическим водонагревателем. Участок водопровода, находящийся внутри ТОА, исполнить из оребренной трубы, сделанной из нержавеющей стали. Труба должна быть погружена полностью в воду внутри ТОА.

3. Минимизировать объём канализационной воды внутри ТОА при максимизировании площади теплообмена (площади водопроводной трубы, находящейся внутри ТОА).

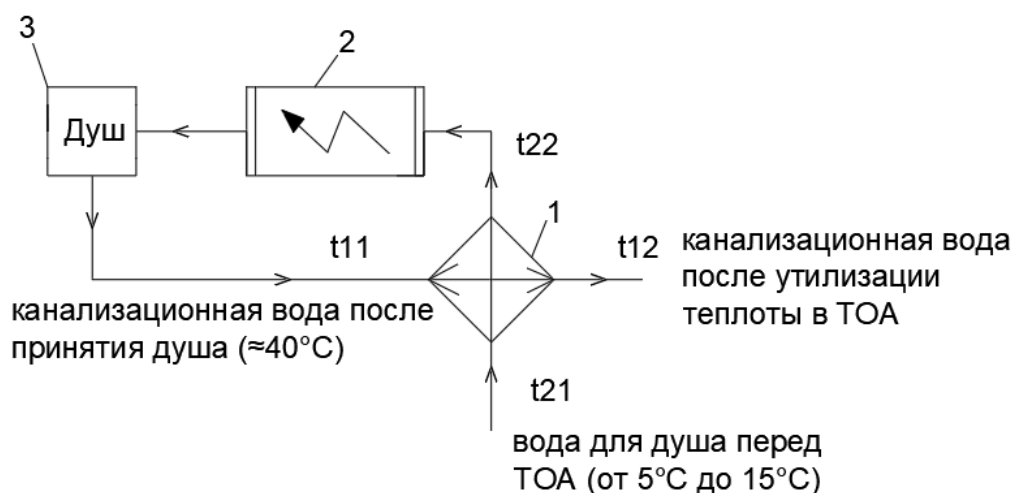


Рис. 1. Принципиальная схема душевой с использованием ТОА для утилизации теплоты горячей воды, удаляемой в канализацию

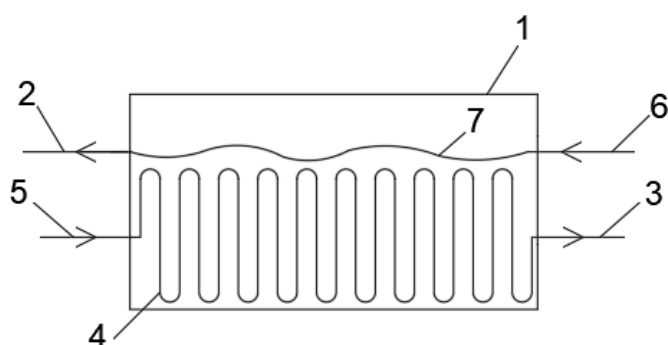


Рис. 2. Схематичное изображение теплообменного аппарата, разработанного для утилизации теплоты горячей воды, удаляемой в канализацию

Схематичное изображение разработанного ТОА представлено на рисунке 2, где 1 – корпус ТОА (пластиковый контейнер), 2 – канализационная труба, удаляющая греющую воду из ТОА, 3 – водопроводная труба, подающая нагретую в ТОА воду в проточный водонагреватель, 4 – участок водопровода, находящийся внутри ТОА (трубы из нержавеющей стали, полностью погруженные в греющую воду), 5 – водопроводная труба, подающая нагреваемую воду в ТОА, 6 – канализационная труба, подающая греющую воду в ТОА, 7 – уровень греющей воды в ТОА (изображен волнистой линией и совпадает с высотой, на которой расположено отверстие для удаления греющей воды).

Чтобы проверить работоспособность данного ТОА, необходимо воплотить его в физическом виде и провести экспериментальное испытание, так как некоторые характеристики (коэффициенты теплоотдачи сред) не могут быть определены расчетным путем. Для проведения эксперимента были выбраны и приобретены все необходимые материалы. Корпус ТОА изготовлен из пластикового контейнера, в котором проделаны отверстия для подвода труб. Для исполнения участка водопровода внутри ТОА выбраны специальные трубы из нержавеющей стали, предназначенные для прокладки тёплого пола. Все нужные технические характеристики труб были получены у производителя.

Испытание ТОА проходило в ванной комнате многоквартирного жилого дома с использованием

сетей внутридомового водоснабжения. В эксперименте в качестве греющей среды использовалась вода с температурой 40 °С (оптимальная для принятия душа с комфортом среднестатистическим человеком). Нагреваемая вода имела температуру 14 °С, а расход внутри трубы составлял 0,14 кг/с. Использовалось 15 м трубы с оребрением диаметром 0,021 м. Площадь теплообмена при данных условиях составила 1,725 м<sup>2</sup>. Греющая среда передавала теплоту нагреваемому участку трубы свободной конвекцией. Данный вывод был сделан исходя из аналитического анализа характера движения воды внутри ёмкости при данных условиях.

Благодаря тому, что в эксперименте используется труба, состоящая из нескольких элементов, имеется возможность изменять длину участка водопровода внутри ТОА и получать данные о температуре воды внутри трубы в некоторых точках и мощности всего теплообменного аппарата. Следовательно, имеется возможность определить коэффициент теплопередачи  $k$  для разной длины участка трубы, находящегося внутри ТОА.

Данные эксперимента представлены в таблице, где  $L$  – длина водопроводной трубы из нержавеющей стали, находящейся внутри ТОА,  $t''_2$  – температура воды на выходе из ТОА при разных значениях длины участка водопроводной трубы внутри ТОА,  $k$  – коэффициент теплопередачи для разной длины участка водопроводной трубы.

**Результаты экспериментального исследования  
характеристик ТОА при разной длине участка водопровода**

Характеристика ТОА	Значение					
$L, \text{ м}$	0	3	6	9	12	15
$t''_2, \text{ }^\circ\text{C}$	14	19	23	27	29,5	30
$k, \text{ Вт/м}^2 \times \text{ К}$	-	330	323	362,3	344,1	299,13

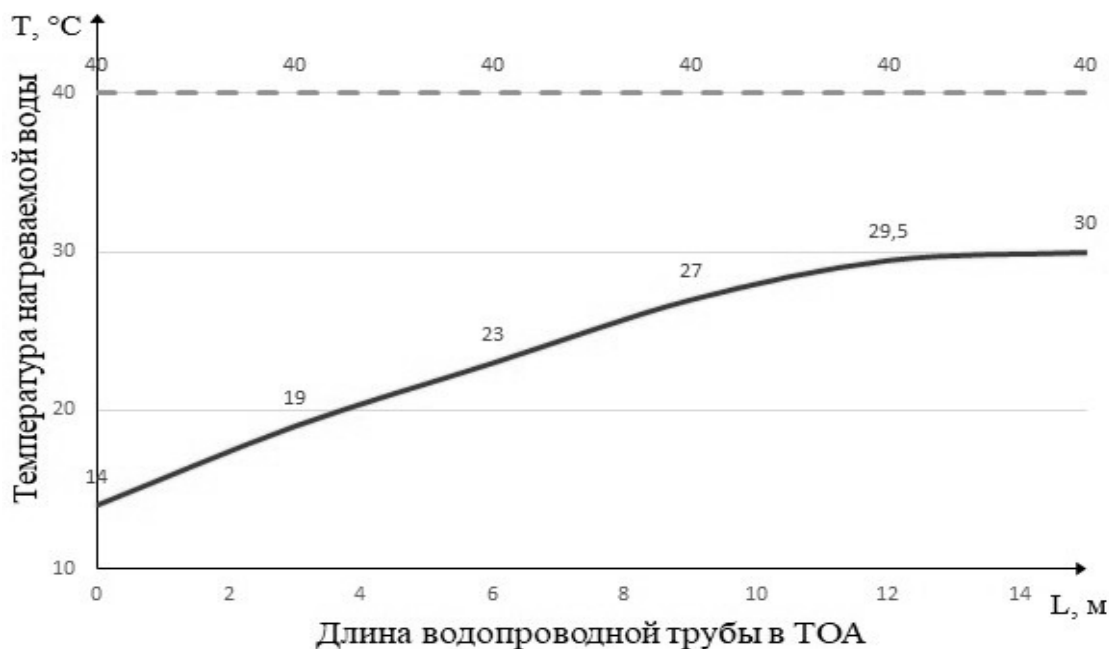


Рис. 3. Зависимость температуры нагреваемой воды на выходе из ТОА от длины водопроводной трубы, находящейся внутри ТОА (сплошная линия)

Коэффициент теплопередачи  $k$  при изменении длины участка водопроводной трубы внутри ТОА остаётся практически одинаковым. Отметим, что оптимальной длиной трубы при данных условиях греющей и нагреваемой сред является длина 12 м, так как увеличение длины участка трубы с 12 до 15 метров приводит к повышению температуры воды на выходе из ТОА всего лишь на 0,5 °C. В рамках нашей работы примем данное увеличение температуры невыгодным по сравнению с затраченными на него материальными ресурсами.

Была определена мощность ТОА в данной конфигурации (длина участка водопровода внутри ТОА – 15 м), которая составила 8690 Вт [1]. На рисунке 3 представлен график, построенный по данным из таблицы. Данный график показывает значение температуры воды на выходе из ТОА в зависимости от длины участка трубы, находящегося внутри ТОА, при постоянной температуре греющей среды (штриховая линия). Обратим внимание на то, что точное значение температуры нагреваемой воды известно только в определённых точках (0; 3; 6; 9; 12; 15 м), соответствующих длине участка трубы внутри ТОА. Между этими точками (внутри отрезков трубы) истинные температуры воды неизвестны. График на рисунке 3 построен с предположением о том, что температура воды изменяется равномерно внутри участка водопровода и является аппроксимированным графиком

истинного изменения температуры воды, нагреваемой в ТОА.

Стоит заметить, что при реальных условиях мы будем наблюдать три стадии работы ТОА:

1. В первые мгновения принятия душа греющая среда внутри ТОА будет иметь температуру, равную температуре воздуха в ванной комнате (26 °C [2]), так как вода остынет до температуры окружающей среды;

2. Далее греющая среда будет менять свою температуру от 26 °C до расчетной температуры 40 °C, нагреваясь от поступающей воды из душа;

3. На третьей стадии работы ТОА греющая среда будет иметь рабочую температуру 40 °C;

Именно наличие данных стадий в работе ТОА требует минимизирования объёма воды внутри ТОА для наискорейшего достижения значения рабочей температуры греющей среды (40 °C). Объём воды внутри ТОА зависит от объёма, который занимает участок водопровода, находящийся внутри ТОА. Именно поэтому важно расположить трубу компактно.

Определим количество электроэнергии, которое можно сэкономить при использовании предлагаемого ТОА. Для расчета примем время использования душа – 10 минут, расход воды из крана – 0,14 кг/с. Для подогрева использован проточный водонагреватель мощностью 7 кВт. Зная теплоёмкость воды, определим количество энергии, необходимое для нагрева 1 кг воды на 1 °C. Получаем 0,00116 кВт·ч электрической

энергии. Далее определим потребление электрической энергии, необходимое для нагрева воды, имеющей температуру 14 °С, до температуры 40 °С по формуле

$$W = 0,00116 \cdot m \cdot \Delta t,$$

где  $W$  – потребление электрической энергии, кВт·ч;

$m$  – масса нагреваемой воды, кг;

$\Delta t$  – разность температур на входе и выходе из водонагревателя, °С.

При использовании ТОВА количество потреблённой электрической энергии для нагрева воды снизится до 2,53 кВт·ч, что меньше в 2,6 раза.

Можно сделать вывод, что способ утилизации теплоты горячей воды, отводимой в канализацию от душевых установок, может быть реализован. Экономия электрической энергии, идущей на нагрев воды

для душа, может быть достигнута. Дальнейшие перспективы данной работы заключаются в оптимизации теплообменной установки: поиске оптимальных размеров ТОВА, поиске оптимальной площади теплообмена.

### Литература

1. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – Изд. 3-е. – Москва : Энергия, 1975. – 488 с.

2. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях : введен 01.01.2013. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 12 с.

*V.A. Kunitsky*

### USE OF HEAT EXCHANGE UNIT FOR RECOVERY OF WASTE SHOWER WATER HEAT ENERGY

The article provides the information on the development of a method for recovering the heat of water discharged from shower devices. For such method, the use of a heat exchanger designed specifically for these conditions and tasks is selected. The process of the developing of the heat exchanger is described; there is a schematic representation of it. The process of calculating heat exchanger is embodied in physical form and experimentally tested. The experimental results and basic formulas for calculating the characteristics of the heat exchanger are presented.

Heat exchanger, heat recovery, energy efficiency, energy saving.



**В.Е. Никифоров<sup>1,2</sup>, Л.А. Никитин<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Вологодский государственный университет

<sup>2</sup>Вологодский Научный Центр Российской Академии Наук

## РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ВАКУУМНОЙ СУШКИ ПРЕССОВАННЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье представлены результаты проектирования и изготовления экспериментальной установки для сушки прессованного сена с использованием вакуума, приведены исследования разработанного метода сушки. Результаты проведенных исследований подтверждают эффективность применения вакуума в процессе удаления влаги для сушки рулонов прессованного сена.

Сушка, прессованное сено, вакуум, теплоноситель, затраты энергии.

Сушка растительных материалов – это важная технологическая операция, обеспечивающая сохранность и получение конечного продукта с высокими качественными показателями. Существующие способы заготовки сена характеризуются большими потерями, которые достигают 55 % [1]. Наиболее сложно заготавливать прессованное сено, льнотресту при неустойчивой влажной погоде, поэтому сельскохозяйственную продукцию, прессованную в кипы или рулоны, подвергают досушиванию [2].

Применение специальных установок активного вентилирования способствует получению более качественной продукции. Существующий конвективный способ сушки растительного сырья относится к категории нормального давления, где в качестве сушильного агента используется нагретый воздух. Основным недостатком применяемого способа сушки являются значительные удельные энергозатраты, которые достигают до 4136 кДж/кг удаленной влаги [3].

Важную роль при сушке играют параметры температуры, толщина высушиваемого материала и его плотность, а существенным недостатком конвективного способа сушки является относительно небольшая величина коэффициента теплоотдачи от сушильного агента к поверхности материала. Влажные материалы являются капиллярно-пористыми телами. Влага в таких материалах связана различными силами. В процессе сушки от переноса тепла и выделения теплоты зависят скорость трансформации температурного поля, глубина проникновения тепловой зоны, скорость изменения температуры и теплового потока на каждом участке. Развитие указанных процессов определяется теплофизическим свойством материалов – теплопроводностью, которая характеризуется коэффициентом  $\lambda$  и зависит от накопления теплоты и объёмной теплоёмкости. На основании кривых распределения относительной влажности воздуха в пограничном слое при сушке материалов значительным потенциалом влагопереноса является энергия связи влаги с материалом  $E$ . Учитывается, что энергия связи влаги с

материалом пропорциональна логарифму относительной влажности воздуха  $\varphi$  [4]

$$E = \left( \frac{dF}{dm} \right)_T = -RT \ln \varphi,$$

где  $F$  – сила переноса влаги,  $T$  – температура.

Растительные материалы отличаются низкой теплопроводностью, соизмеримой с высококачественными теплоизоляционными материалами. Прессованное сено плотностью 110–150 кг/м<sup>3</sup> характеризуется как материал с низким значением коэффициента теплопроводности  $\lambda=0,053\pm 0,11$  Вт/(м·°С). Вследствие плохой теплопроводности теплота задерживается в основном в наружных слоях или контактирующих непосредственно с горячей поверхностью сушилки. Во время просушки первыми высыхают слои, которые находятся в области подачи теплого воздуха, происходит постепенное перемещение просушенной зоны с увлажнением других, что вызывает дополнительные энергетические затраты и увеличивает время сушки.

Современные исследования процесса сушки растительного сырья свидетельствуют о том, что массообменные и тепловые процессы зачастую сопровождаются реакцией окисления с изменением структурно-физических свойств, что приводит к частичной потере качества или полной утрате ценности продукта. Поэтому главной целью сушки является как удаление влаги, так и получение качественного сырья при максимальной сохранности биологически активных веществ, органических кислот, витаминов. В то же время при сушке требуется сохранить исходные энергетические показатели кормового продукта, такие как углеводы, сахара и протеин.

Возможность совершенствования послеуборочной обработки сена связана с использованием вакуума и созданием эффективной технологии досушки сена в прессованном виде. Существенное снижение энергопотребления достигается за счет применения способа сушки растительных материалов в вакуумных сушильных камерах. Анализ тенденций развития вакуумной сушки выявил, что процесс сушки объемистого

корма из растительного прессованного материала с использованием вакуумного способа удаления влаги не изучен и не получил практического опыта.

Нами разработан новый способ сушки волокнистых прессованных материалов (патент № 2476085), который основан на формировании специального режима с определенными периодами сушки, включающими нагрев растительного материала в вакууме [5]. Способ определяет основные принципы технологии сушки волокнистых прессованных материалов в вакууме и характеризует конструктивную особенность сушильной установки для создания наиболее экономичного процесса влагоотдачи. Выбор показателей и расчет параметров для разрабатываемой технологии сушки сена основан на создании вакуумметрического давления (например, температура кипения воды при

давлении 0,01 МПа составляет 45,5 °С). Это обеспечивает сокращение продолжительности процесса сушки при относительно незначительных энергетических затратах (0,6 кВт на 1 кг воды) [6, 7].

Исследования по разработке и созданию экспериментальной установки вакуумной сушки прессованных растительных материалов выполнены в результате реализации государственного научного гранта Вологодской области в 2019 г. по теме «Повышение качества заготовки растительного корма путем использования вакуума в процессе удаления влаги».

На рисунке 1 представлена аппаратная схема экспериментальной установки сушки прессованного сена с использованием вакуума, которая содержит необходимое оборудование контроля для управления режимом работы данной технологии.

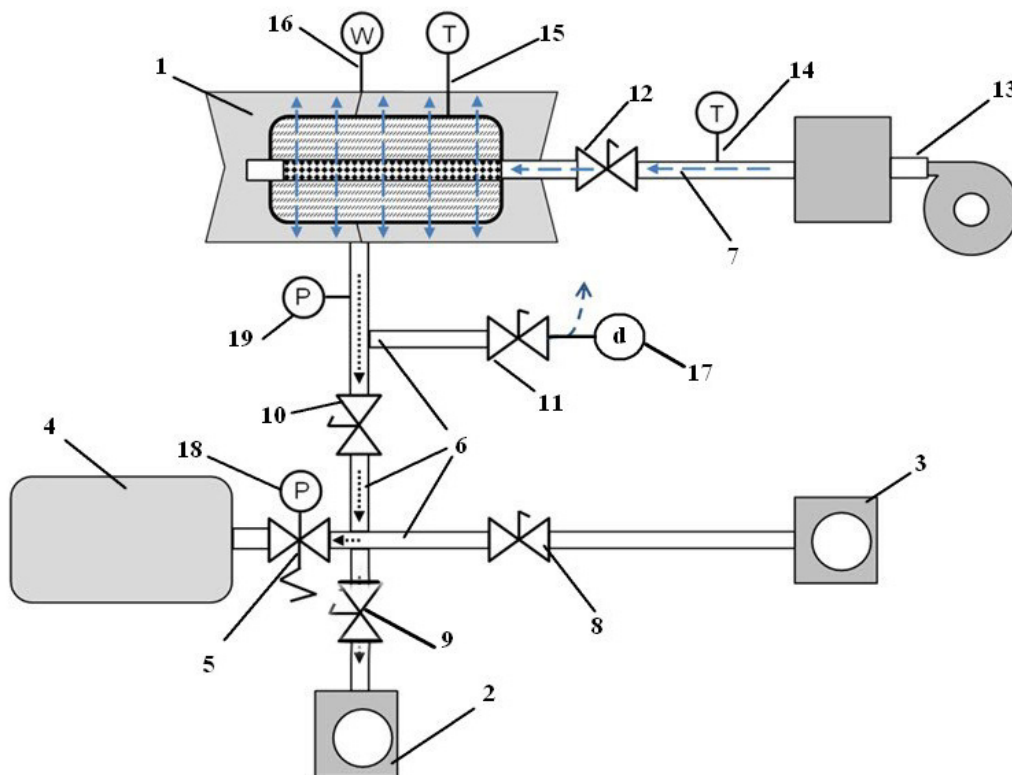


Рис. 1. Аппаратная схема



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

Экспериментальная установка для сушки прессованного сена содержит вакуумную камеру (1), вакуумные насосы (2, 3), ресивер (4), предохранительный клапан (5), вакуумные трубопроводы (6), подачи теплоносителя (7), краны (8–12), электрокалорифер (13), систему контроля температуры теплоносителя (14), температуры и влажности материала (15, 16), измеритель относительной влажности воздуха (17), вакуумметры ресивера и сушильной камеры (18, 19).

Компоновка и монтаж основного экспериментального оборудования выполнены в соответствии с аппаратной схемой. На рисунке 2 представлен общий вид экспериментальной установки, где на переднем плане показана вакуумная сушильная камера с системой контроля температуры и влажности материала.

Поступление тепла в вакуумной сушильной камере производится непосредственно в центральную часть рулона с радиальным распределением теплоносителя к наружным слоям. Подача теплого воздуха в камеру осуществляется трубопроводом с диаметром 60 мм. Температура нагрева теплоносителя от тепловой установки устанавливается и поддерживается автоматически с помощью термометрического регулятора.

Экспериментальные исследования разделены по различным условиям протекания процесса с заданным режимом работы оборудования. На первой стадии происходит испарение свободной (капиллярной) влаги, которая удерживается на поверхности материала за счёт механических связей и легко удаляется при обычной сушке. На второй стадии происходит удаление связанной (гигроскопической) влаги, которая удерживается на уровне физико-химических связей. Удаление этого вида влаги из растительного материала затруднено и сопровождается большими затратами энергии. На первой стадии используется конвективная сушка рулонов сена с воздействием вакуума  $P=90$  кПа, который создается при работе вакуумного насоса РВН 40/350. Низкий вакуум (10–20 кПа) на второй

стадии сушки обеспечивается включением в работу вакуумного насоса МРВ-5.

Сушка при начальной влажности  $w=33,2$  % производилась путем подачи нагретого воздуха от вентиляционно-калориферной установки через центральный воздухопровод при создании дополнительного вакуумметрического давления в камере. В начальный период сушки для эффективного процесса удаления влаги осуществляется периодическая вентиляция камеры и продувка рулона с нагретым материалом до температуры 50–60 °С. Второй этап досушки ( $P=10-20$  кПа) происходит с удалением связанной влаги. Таким образом, создаются определенные вакуумные периоды, чтобы максимально выделить влагу из материала. С подачей теплоносителя выделенная влага в виде насыщенного пара принудительно удаляется.

На рисунке 3 представлен график, показывающий зависимость сушки прессованного рулона сена при создании вакуума ( $P=90$  кПа и  $P=10-20$  кПа).

В начале процесса сушки теплоноситель максимально насыщается влагой за счет поверхностной свободной влаги, которая легко испаряется. Далее относительная влажность отработанного теплоносителя постепенно снижается, он не успевает полностью насыщаться от внутренней связанной влаги, которую удалить значительно труднее. Поэтому для повышения скорости сушки необходимо увеличить вакуум, чтобы обеспечить удаление влаги из внутренних слоев.

Таким образом, метод сушки предусматривает специальный режим работы оборудования и определяет процесс удаления влаги в вакууме:

- при влажности 30–35 % в материале присутствует поверхностная влага, необходимо использовать принудительное удаление испаряемой влаги из сушильной камеры, создаваемый вакуум – 90 кПа;
- при влажности 22 % увеличивается влагоудерживающая сила, для удаления внутренней влаги необходимо обеспечить вакуум – 10–20 кПа.

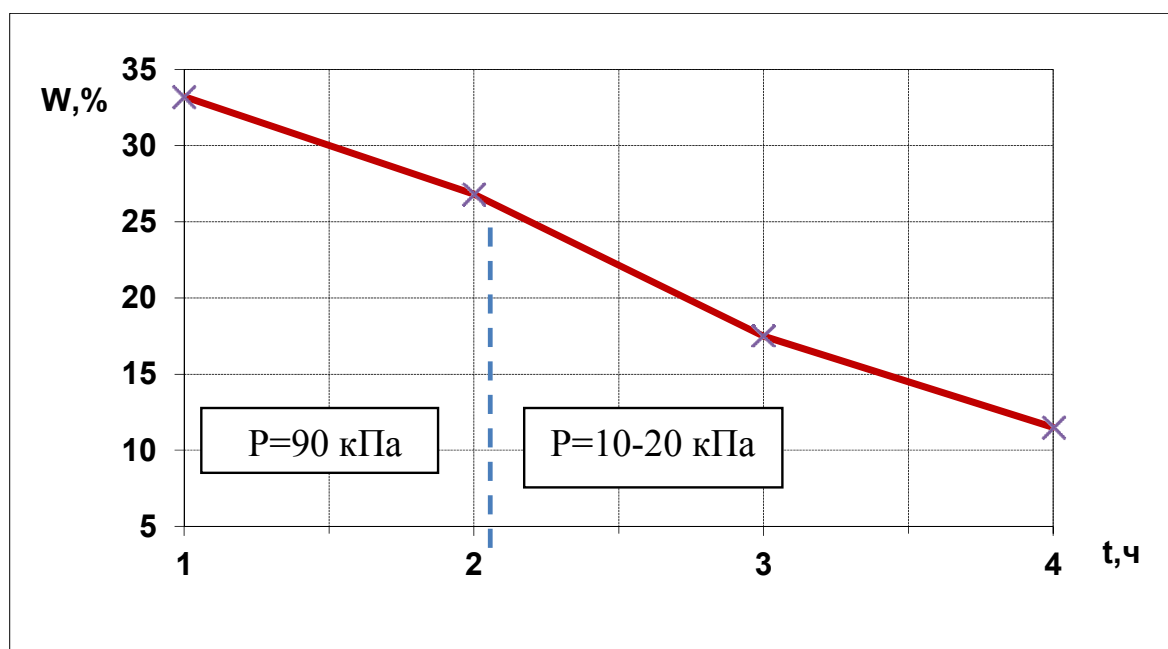


Рис. 3. Процесс сушки в вакуумной камере

## Литература

По работе оборудования процесс вакуумного способа удаления влаги представлен в виде последовательности технологических операций:

- нагрев материала, продувка с удалением поверхностной влаги;
- работа вакуумного насоса и создание вакуума в ресивере;
- создание вакуума в камере с удалением внутренней влаги;
- продувка материала в камере с удалением насыщенного пара;
- охлаждение материала, продувка материала холодным воздухом.

Проведены работы по разработке и проектированию экспериментальной установки вакуумной сушки прессованных растительных материалов.

Результаты исследований подтверждают эффективность применения вакуума в процессе удаления влаги для сушки рулонов прессованного сена. Нагрев материала в вакууме характеризует особый режим сушки, при котором удаление влаги протекает более активно, чем при атмосферном давлении. Предложен метод сушки, на первом этапе которого происходит удаление свободной влаги, на втором этапе происходит удаление связанной влаги. Увеличение скорости вакуумной сушки возможно путем повышения температуры теплоносителя и нагрева материала, а также степени вакуумного воздействия.

1. Ахламов, Ю. Заготовка кормов в рулонах. Животноводство России / Ю. Ахламов. – 2003. – № 6. – С. 40–41.

2. Оробинский, Д. Ф. Уборка льна в условиях Северо-Западного региона России : учебное пособие / Д. Ф. Оробинский. – Вологда-Молочное : ИЦ ВГМХА, 2007. – 190 с.

3. Пятрушьявичус, В. И. Активное вентилирование травяных кормов / В. И. Пятрушьявичус, В. М. Любарский. – Ленинград : Агропромиздат, 1986. – 96 с.

4. Лыков, А. В. Тепломассообмен : справочник / А. В. Лыков. – Москва : Энергия, 1978. – 480 с.

5. Патент 2476085 Российская Федерация, МПК А23К 3/02, А23В 7/00. Способ сушки волокнистых прессованных материалов : заявл. № 2010154629/13: опубл. 27.02.2013, бюл. № 6. – 3 с. / Углин В. К., Никифоров В. Е., Тяпугин Е. А., Тяпугин С. Е.

6. Никифоров, В. Е. Технология заготовки кормов с досушкой прессованного сена вакуумным способом удаления влаги / В. Е. Никифоров, Л. А. Никитин, В. К. Углин // АгроЗооТехника, 2019. – Т. 2, № 1. – С. 44–50.

7. Маклахов, А. В. Совершенствование технологии заготовки сена в рулонах / А. В. Маклахов, В. К. Углин, В. Е. Никифоров // Владимирский земледелец. – 2017. – № 4. – С. 28–30.

*V.E. Nikiforov, L.A. Nikitin*

### **DEVELOPMENT OF EXPERIMENTAL INSTALLATION FOR VACUUM DRYING OF COMPRESSED VEGETABLE MATERIALS**

The article presents the results on the design and manufacture of an experimental plant for drying pressed hay using vacuum, and provides research of the drying method having being developed. The results of this research confirms the effectiveness of applying vacuum in the moisture removal process to dry rolls of pressed hay.

Drying, pressed hay, vacuum, heat carrier, energy consumption.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ. ЧАСТЬ 2

Цель исследования состоит в разработке компактных методов расчета механических систем с несколькими степенями свободы для установившихся режимов. Представление гармонических величин в виде вращающихся векторов в комплексной плоскости и операции с их комплексными амплитудами позволяют многократно облегчить расчет сколь угодно сложных механических систем при гармонических воздействиях в установившемся режиме.

Реактанс, резистанс, импеданс, сассептанс, кондактанс, адмитанс.

Расчет динамики механической системы [1] с  $n$  степенями свободы [2], включающей инертные [3] и упругие элементы [4], предполагает составление и интегрирование системы из  $n$  дифференциальных уравнений второго порядка [5], которые сводятся к дифференциальному уравнению  $2n$  порядка. Увеличение степени свободы на единицу увеличивает порядок результирующего дифференциального уравнения на два. Решение дифференциальных уравнений высоких порядков является достаточно громоздким и трудоемким [6].

Цель исследования состоит в разработке компактных методов расчета механических систем с несколькими степенями свободы для установившихся режимов.

Далее используются следующие обозначения и терминология:

- $\underline{x}_m = \omega m e^{i\frac{\pi}{2}} = i\omega m$  – инертный реактанс [7] в комплексном представлении;
- $\underline{x}_k = -\frac{k}{\omega} e^{-i\frac{\pi}{2}} = \frac{k}{\omega} e^{-i\frac{\pi}{2}} = -i\frac{k}{\omega}$  – упругий реактанс;
- $\underline{r} = r$  – механический резистанс;
- $\underline{z} = r + \underline{x} = r + \left(m\omega - \frac{k}{\omega}\right) e^{i\frac{\pi}{2}}$  – механический импеданс;
- $\underline{b}_m = \frac{1}{\omega m} e^{-i\frac{\pi}{2}} = -i\frac{1}{\omega m} = \frac{1}{\underline{x}_m}$  – инертный сассептанс;
- $\underline{b}_k = \frac{\omega}{k} e^{i\frac{\pi}{2}} = i\frac{\omega}{k} = \frac{1}{\underline{x}_k}$  – упругий сассептанс;
- $\underline{g} = g = \frac{1}{r}$  – механический кондактанс;
- $\underline{y} = g + \underline{b} = g + \left(\frac{\omega}{k} - \frac{1}{\omega m}\right) e^{i\frac{\pi}{2}}$  – механический адмитанс.

Сила, скорость, импеданс и адмитанс связаны формулами

$$\dot{F} = \underline{z} \dot{V} = ZV e^{i\varphi}, \quad (1)$$

$$\dot{V} = \underline{y} \dot{F} = Y e^{i\varphi} F e^{i\frac{\pi}{2}} = Y F e^{i(\varphi + \frac{\pi}{2})}. \quad (2)$$

**Несколько релевантных теорем.** Соотношение между  $\underline{y}$  и  $\underline{z}$  устанавливает

*Теорема 1.* Для механической системы справедлива формула  $\underline{y} = \frac{1}{\underline{z}}$ .

*Доказательство.* В соответствии с (1)

$$\underline{z} = \frac{\dot{F}}{\dot{V}}$$

В соответствии с (2)  $\underline{y} = \frac{\dot{V}}{\dot{F}} = \frac{1}{\underline{z}}$ . Теорема доказана.

*Следствие 1.1.* Для механической системы без демфера справедлива формула  $\underline{b} = 1/\underline{x}$ , поскольку в этом случае  $\underline{y} = \underline{b}$ ,  $\underline{z} = \underline{x}$ .

*Теорема 2.* Эквивалентные величины для механической системы определяются формулами:

$$g^* = \frac{r}{r^2 + x^2}, \quad b^* = \frac{x}{r^2 + x^2} e^{-i\frac{\pi}{2}}, \quad r^* = \frac{g}{g^2 + b^2},$$

$$x^* = \frac{b}{g^2 + b^2} e^{-i\frac{\pi}{2}}.$$

*Доказательство.*  $\underline{z} = r + \underline{x} = r + ix$ ,

$$\underline{y} = \frac{1}{\underline{z}} = \frac{1}{r + ix} \frac{r - ix}{r - ix} = \frac{r - ix}{r^2 + x^2} = \frac{r}{r^2 + x^2} - i \frac{x}{r^2 + x^2} = g^* + b^*,$$

$$\underline{y} = g + \underline{b} = g + ib,$$

$$\underline{z} = \frac{1}{\underline{y}} = \frac{1}{g + ib} \frac{g - ib}{g - ib} = \frac{g - ib}{g^2 + b^2} = \frac{g}{g^2 + b^2} - i \frac{b}{g^2 + b^2} = r^* + x^*.$$

Теорема доказана.

Пусть  $n$  объектов с механическими адмитансами  $\underline{y}_1, \dots, \underline{y}_n$  соединены последовательно. Эквивалентный адмитанс системы –  $\underline{y}$ . Имеет место

**Теорема 3.** При последовательном соединении объектов справедлива формула  $\underline{y} = \sum_{j=1}^n \underline{y}_j$ .

**Доказательство.** При последовательном соединении к объектам приложена единая сила  $\dot{F}$ . Для произвольного объекта в соответствии с (2) справедлива формула  $\dot{V}_j = \underline{y}_j \dot{F}$ .

Согласно принципу суперпозиции скорость штока источника силового гармонического воздействия равна  $\dot{V} = \sum_{j=1}^n \dot{V}_j = \sum_{j=1}^n \underline{y}_j \dot{F} = \dot{F} \sum_{j=1}^n \underline{y}_j = \dot{F} \underline{y}$ .

Теорема доказана.

**Следствие 3.1.** 
$$\frac{1}{\underline{z}} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{\underline{z}_j}$$

**Следствие 3.2.** 
$$\underline{z} = \frac{\prod_{j=1}^n \underline{z}_j}{\sum_{k=1}^n \prod_{j=1, j \neq k}^n \underline{z}_j}$$

**Следствие 3.3.** Эквивалентный механический импеданс меньше каждого из составляющих механических импедансов.

**Следствие 3.4.**

При  $\underline{z}_1 = \underline{z}_2 = \dots = \underline{z}_j = \dots = \underline{z}_n = \underline{z}^*$   $\underline{z} = \frac{\underline{z}^*}{n}$ .

**Следствие 3.5.** 
$$\lim_{\underline{z}_1 \rightarrow \infty} \underline{z} = \frac{\prod_{j=2}^n \underline{z}_j}{\sum_{k=2}^n \prod_{j=2, j \neq k}^n \underline{z}_j}$$

Пусть  $n$  объектов с механическими импедансами  $\underline{z}_1, \dots, \underline{z}_n$  соединены параллельно. Эквивалентный импеданс системы –  $\underline{z}$ . Имеет место

**Теорема 4.** При параллельном соединении объектов справедлива формула  $\underline{z} = \sum_{j=1}^n \underline{z}_j$ .

**Доказательство.** При параллельном соединении объекты обладают единой скоростью  $\dot{V}$ . Для произвольного объекта в соответствии с (1) справедлива формула  $\dot{F}_j = \underline{z}_j \dot{V}$ .

Согласно принципу суперпозиции сила, приложенная к системе, равна

$$\dot{F} = \sum_{j=1}^n \dot{F}_j = \sum_{j=1}^n \underline{z}_j \dot{V} = \dot{V} \sum_{j=1}^n \underline{z}_j = \dot{V} \underline{z}$$

Теорема доказана.

**Следствие 4.1.** 
$$\frac{1}{\underline{y}} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{\underline{y}_j}$$

**Следствие 4.2.** 
$$\underline{y} = \frac{\prod_{j=1}^n \underline{y}_j}{\sum_{k=1}^n \prod_{j=1, j \neq k}^n \underline{y}_j}$$

**Следствие 4.3.** Эквивалентный механический адмитанс меньше каждого из составляющих механических адмитансов.

**Следствие 4.4.**

При  $\underline{y}_1 = \underline{y}_2 = \dots = \underline{y}_j = \dots = \underline{y}_n = \underline{y}^*$   $\underline{y} = \frac{\underline{y}^*}{n}$ .

**Следствие 4.5.** 
$$\lim_{\underline{y}_1 \rightarrow \infty} \underline{y} = \frac{\prod_{j=2}^n \underline{y}_j}{\sum_{k=2}^n \prod_{j=2, j \neq k}^n \underline{y}_j}$$

**Параллельно-последовательное соединение потребителей механической мощности.** Схема соединения показана на рисунке 1.

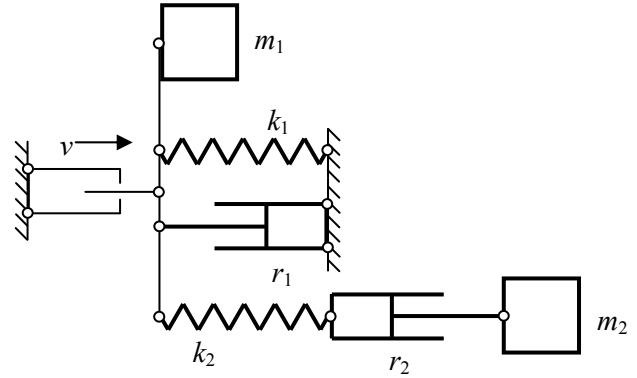


Рис. 1. Параллельно-последовательное соединение

В соответствии с теоремой 1  $\underline{z}_2 = 1/\underline{y}_2$ . В соответствии с теоремой 4  $\underline{z} = \underline{z}_1 + \underline{z}_2$ . В соответствии с (1)  $\dot{V} = \dot{F}/\underline{z}$ .

**Пример 1.**  $\dot{F} = 100e^{j0}$  (Н),  $\omega = 2$  рад/с,  $m = 10$  кг,  $k = 20$  (кг · с<sup>-2</sup>),  $r = 7$  (кг · с<sup>-1</sup>). Найти все силы и скорости в установившемся режиме.

$\underline{z}_2 = 1/\underline{y}_2 = 1/(15,135 \cdot 10^{-2} e^{i19,29^\circ}) \approx 6,607 e^{-i19,29^\circ}$  (кг · с<sup>-1</sup>),  
 $\underline{z} = \underline{z}_1 + \underline{z}_2 = 12,207 e^{i55^\circ} + 6,607 e^{-i19,29^\circ} = 15,372 e^{i30,57^\circ}$  (кг · с<sup>-1</sup>)

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{F}/\underline{z} = 100/(15,372 e^{i30,57^\circ}) = 6,505 e^{-i30,57^\circ} \text{ (м · с}^{-1}\text{)}, \\ \dot{F}_{m1} &= \underline{z}_{m1} \dot{V} = 20 e^{i90^\circ} \cdot 6,505 e^{-i30,57^\circ} = 130,1 e^{i59,43^\circ} \text{ (Н)}, \\ \dot{F}_{k1} &= \underline{z}_{k1} \dot{V} = 10 e^{-i90^\circ} \cdot 6,505 e^{-i30,57^\circ} = 65,05 e^{-i120,57^\circ} \text{ (Н)}, \\ \dot{F}_{r1} &= r_1 \dot{V} = 7 e^{i0} \cdot 6,505 e^{-i30,57^\circ} = 45,535 e^{-i30,57^\circ} \text{ (Н)}, \\ \dot{F}_2 &= \underline{z}_2 \dot{V} = 6,607 e^{-i19,29^\circ} \cdot 6,505 e^{-i30,57^\circ} = 42,979 e^{-i49,86^\circ} \text{ (Н)}, \\ \dot{V}_{m2} &= \underline{b}_{m2} \dot{F}_2 = 5 \cdot 10^{-2} e^{-i90^\circ} \cdot 42,979 e^{-i49,86^\circ} = 2,149 e^{-i139,86^\circ} \text{ (м · с}^{-1}\text{)}, \\ \dot{V}_{k2} &= \underline{b}_{k2} \dot{F}_2 = 10 \cdot 10^{-2} e^{i90^\circ} \cdot 42,979 e^{-i49,86^\circ} = 4,298 e^{i40,14^\circ} \text{ (м · с}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

$$\dot{V}_{r2} = g_2 \dot{F}_2 = 14,286 \cdot 10^{-2} \cdot 42,979 e^{-i49,86^\circ} = 6,14 e^{-i49,86^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}).$$

Классический расчет предполагает составление и решение системы дифференциальных уравнений [8] и поэтому несоизмеримо сложнее и объемнее по сравнению с примером 1.

Векторная диаграмма для величин из примера 1 представлена на рисунке 2.

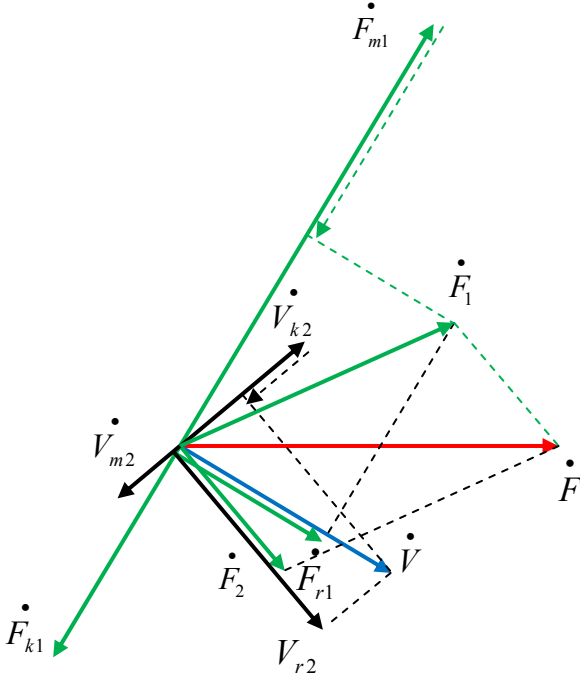


Рис. 2. Векторная диаграмма при параллельно-последовательном соединении

**Двойной (параллельно-последовательный) резонанс.** В дополнение к вышесказанному о резонансах сил и скоростей [9] можно ограничиться численным примером.

*Пример 2.*  $k = 40 (\text{кг} \cdot \text{с}^{-2})$ . Остальные данные – из примера 1. Найти все силы и скорости в установившемся режиме.

$$\underline{z}_1 = \underline{z}_2 = r = 7 e^{i0^\circ} (\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}),$$

$$\underline{z} = \underline{z}_1 + \underline{z}_2 = 2r = 14 e^{i0^\circ} (\text{кг} \cdot \text{с}^{-1}),$$

$$\dot{V} = \dot{F} / \underline{z} = 100 / (14 e^{i0^\circ}) = 7,143 e^{i0^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}),$$

$$\dot{F}_{m1} = \underline{x}_{m1} \dot{V} = 20 e^{i90^\circ} \cdot 7,143 e^{i0^\circ} = 142,857 e^{i90^\circ} (\text{Н}),$$

$$\dot{F}_{k1} = \underline{x}_{k1} \dot{V} = 20 e^{-i90^\circ} \cdot 7,143 e^{i0^\circ} = 142,857 e^{-i90^\circ} (\text{Н}),$$

$$\dot{F}_{r1} = \dot{F}_1 = r_1 \dot{V} = 7 e^{i0^\circ} \cdot 7,143 e^{i0^\circ} = 50 e^{i0^\circ} (\text{Н}),$$

$$\dot{F}_2 = \underline{z}_2 \dot{V} = 7 e^{i0^\circ} \cdot 7,143 e^{i0^\circ} = 50 e^{i0^\circ} (\text{Н}),$$

$$\dot{V}_{m2} = \underline{b}_{m2} \dot{F}_2 = 5 \cdot 10^{-2} e^{-i90^\circ} \cdot 50 e^{i0^\circ} = 2,5 e^{-i90^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}),$$

$$\dot{V}_{k2} = \underline{b}_{k2} \dot{F}_2 = 5 \cdot 10^{-2} e^{i90^\circ} \cdot 50 e^{i0^\circ} = 2,5 e^{i90^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}),$$

$$\dot{V}_{r2} = g_2 \dot{F}_2 = 14,286 \cdot 10^{-2} \cdot 50 e^{i0^\circ} = 7,143 e^{i0^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}).$$

Векторная диаграмма для величин из примера 2 представлена на рисунке 3.

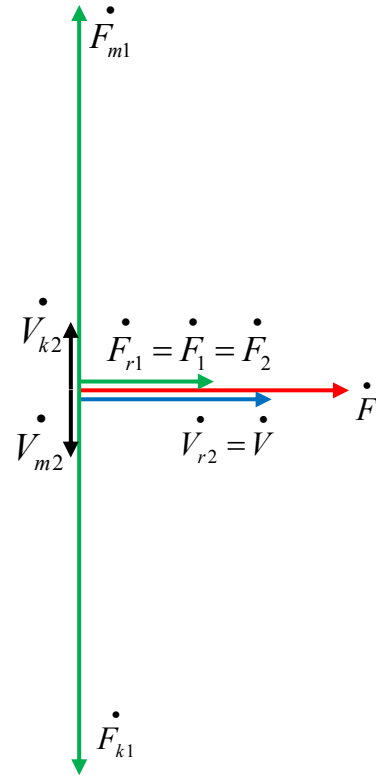


Рис. 3. Векторная диаграмма при двойном резонансе

**Последовательно-параллельное соединение потребителей механической мощности.** Схема соединения показана на рисунке 4.

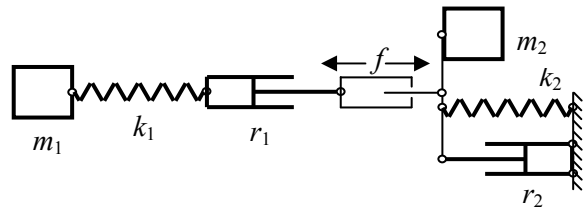


Рис. 4. Последовательно-параллельное соединение

В соответствии с теоремой 1  $\underline{y}_2 = 1/\underline{z}_2$ . В соответствии с теоремой 3  $\underline{y} = \underline{y}_1 + \underline{y}_2$ . В соответствии с (2) скорость штока  $\dot{V} = \underline{y} \dot{F}$ .

*Пример 3.* Для данных примера 1 найти все силы и скорости в установившемся режиме.

$$\underline{y}_2 = 1/\underline{z}_2 = 1/(12,207 e^{i55^\circ}) = 8,192 \cdot 10^{-2} e^{-i55^\circ} (\text{кг}^{-1} \cdot \text{с}),$$

$$\underline{y} = \underline{y}_1 + \underline{y}_2 = 15,135 \cdot 10^{-2} e^{i19,29^\circ} + 8,192 \cdot 10^{-2} e^{-i55^\circ} = 19,061 \cdot 10^{-2} e^{-i5,126^\circ} (\text{кг}^{-1} \cdot \text{с}),$$

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \dot{F} \underline{y} = 100 \cdot 19,061 \cdot 10^{-2} e^{-i5,126^\circ} = 19,061 e^{-i5,126^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}), \\ \dot{V}_2 &= \dot{F} \underline{y}_2 = 100 \cdot 8,192 \cdot 10^{-2} e^{-i55^\circ} = 8,192 e^{-i55^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}). \\ -\dot{V}_1 + \dot{V}_2 &= 15,135 e^{i19,29^\circ} + 8,192 e^{-i55^\circ} = 19,061 e^{-i5,126^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}) = \dot{V}.\end{aligned}$$

Векторная диаграмма для величин из примера 3 представлена на рисунке 5.

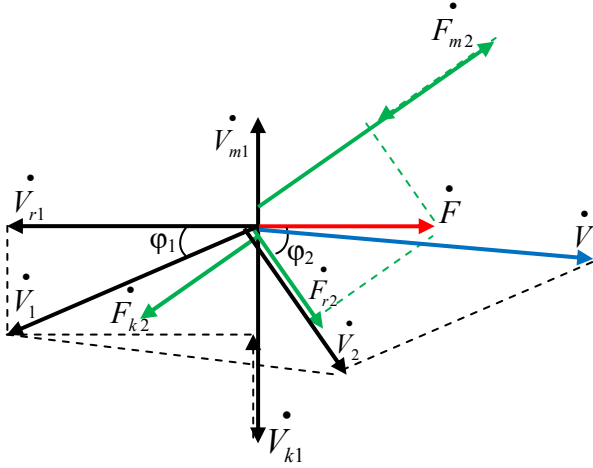


Рис. 5. Последовательно-параллельное соединение

**Двойной (последовательно-параллельный) резонанс.** В дополнение к вышесказанному о резонансах сил и скоростей можно ограничиться численным примером.

*Пример 4.* Для данных примера 2 найти все силы и скорости в установившемся режиме.

$$\begin{aligned}\underline{y}_1 = 1/\underline{z}_1 = g_1 = \underline{y}_2 = 1/\underline{z}_2 = g_2 &= 1/(12,207 e^{i55^\circ}) = \\ &= 14,286 \cdot 10^{-2} e^{i0^\circ} (\text{к}\Omega^{-1} \cdot \text{с}),\end{aligned}$$

$$\underline{y} = \underline{y}_1 + \underline{y}_2 = 2 \cdot 14,286 \cdot 10^{-2} e^{i0^\circ} = 28,571 \cdot 10^{-2} e^{i0^\circ} (\text{к}\Omega^{-1} \cdot \text{с}),$$

$$\dot{V} = \dot{F} \underline{y} = 100 \cdot 28,571 \cdot 10^{-2} e^{i0^\circ} = 28,571 e^{i0^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}),$$

$$\dot{V} = -\dot{V}_1 + \dot{V}_2,$$

$$-\dot{V}_1 = -\dot{F} \underline{y}_1 = \dot{V}_2 = \dot{F} \underline{y}_2 = 100 \cdot 14,286 \cdot 10^{-2} e^{i0^\circ} =$$

$$= 14,286 e^{i0^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1})$$

$$-\dot{V}_{m1} = \underline{b}_{m1} \dot{F} = 5 \cdot 10^{-2} e^{-i90^\circ} \cdot 100 e^{i0^\circ} = 5 e^{-i90^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}),$$

$$-\dot{V}_{k1} = \underline{b}_{k1} \dot{F} = 5 \cdot 10^{-2} e^{i90^\circ} \cdot 100 e^{i0^\circ} = 5 e^{i90^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}),$$

$$-\dot{V}_{r1} = -g_1 \dot{F} = 14,286 \cdot 10^{-2} \cdot 100 e^{i0^\circ} = 14,286 e^{i0^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}),$$

$$\dot{F}_{m2} = \underline{x}_{m2} \dot{V}_2 = 20 e^{i90^\circ} \cdot 14,286 e^{i0^\circ} = 285,714 e^{i90^\circ} (\text{Н}),$$

$$\dot{F}_{k2} = \underline{x}_{k2} \dot{V}_2 = 20 e^{-i90^\circ} \cdot 14,286 e^{i0^\circ} = 285,714 e^{-i90^\circ} (\text{Н}),$$

$$\dot{F}_{r2} = \dot{F}_2 = \dot{F} = r_2 \dot{V}_2 = 7 e^{i0^\circ} \cdot 14,286 e^{i0^\circ} = 100 e^{i0^\circ} (\text{Н}).$$

Векторная диаграмма для величин из примера 4 представлена на рисунке 6.

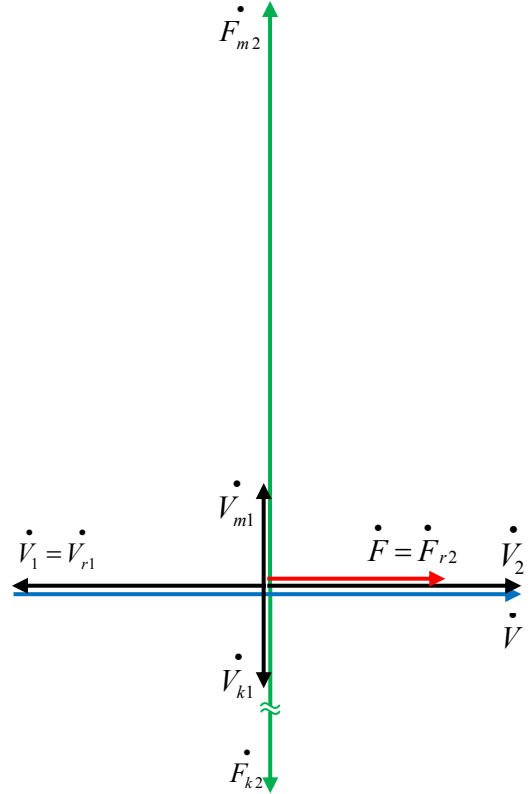


Рис. 6. Векторная диаграмма при двойном (последовательно-параллельном) резонансе

**О характере механического импеданса.** Пусть

$$\dot{F} = F e^{i0},$$

$$\underline{z} = r + \underline{x}_m = \sqrt{r^2 + x_m^2} e^{i \arctg \frac{x_m}{r}} = z e^{i\varphi}.$$

Тогда 
$$\dot{V} = \frac{\dot{F}}{\underline{z}} = \frac{F e^{i0}}{z e^{i\varphi}} = \frac{F}{z} e^{-i\varphi}.$$

*Пример 5.* Для данных предыдущих примеров

$$\underline{z} = \sqrt{r^2 + x_m^2} e^{i \arctg \frac{x_m}{r}} = \sqrt{7^2 + 20^2} e^{i \arctg \frac{20}{7}} \approx 21,19 e^{i70,71^\circ} (\text{к}\Omega \cdot \text{с}^{-1}),$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{F}}{\underline{z}} = \frac{100 e^{i0}}{21,19 e^{i70,71^\circ}} \approx 4,719 e^{-i70,71^\circ} (\text{м} \cdot \text{с}^{-1}).$$

Векторная диаграмма для величин из примера 5 представлена на рисунке 7.

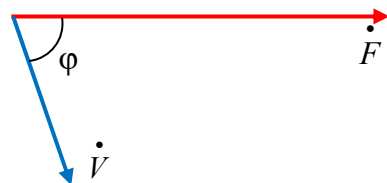


Рис. 7. Инертный характер

Пусть  $\underline{z} = r + \underline{x}_k = \sqrt{r^2 + x_k^2} e^{i \arctg \frac{x_k}{r}} = z e^{i\varphi}$ .

*Пример 6.* Для данных предыдущих примеров

$$\underline{z} = \sqrt{r^2 + x_k^2} e^{i \arctg \frac{x_k}{r}} = \sqrt{7^2 + 10^2} e^{i \arctg \frac{10}{7}} \approx$$

$$12,207 e^{-i55^\circ} \text{ (кз} \cdot \text{с}^{-1}\text{)},$$

$$\dot{\underline{V}} = \frac{\dot{F}}{\underline{z}} = \frac{100 e^{i0}}{12,207 e^{-i55^\circ}} \approx 8,192 e^{i55^\circ} \text{ (м} \cdot \text{с}^{-1}\text{)}.$$

Векторная диаграмма для величин из примера 6 представлена на рисунке 8.

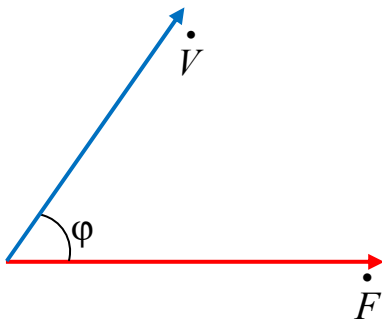


Рис. 8. Упругий характер

Представленные выше рассуждения можно принять в качестве иллюстрации справедливости следующей теоремы.

*Теорема 5.* При инертном характере нагрузки скорость отстает по фазе от приложенной силы. При упругом – опережает. При резистивном – совпадает.

*Замечание 5.1.* Если  $\underline{x} = \underline{x}_m + \underline{x}_k$  и  $\underline{x}_m > \underline{x}_k$ , то нагрузка имеет инертный характер. Если  $\underline{x}_m < \underline{x}_k$ , то упругий [10].

**Схемное изменение характера нагрузки.** Пусть нагрузка состоит из инертного тела и упругого элемента. Пусть  $\sqrt{k/m} \neq \omega$ . Для этих условий имеет место

*Теорема 6.* При изменении схемы соединения инертного тела и упругого элемента с параллельного на последовательное или наоборот характер нагрузки меняется.

*Доказательство.* Пусть  $\underline{x}_m > \underline{x}_k$ . При параллельном соединении

$$\underline{x} = \underline{x}_m + \underline{x}_k = \left( m\omega - \frac{k}{\omega} \right) e^{i\frac{\pi}{2}}$$

и в соответствии с замечанием 5.1 нагрузка имеет инертный характер. Фаза  $i\pi/2 > 0$ .

При изменении схемы соединения на последовательное

$$\underline{b} = \underline{b}_k + \underline{b}_m = \left( \frac{\omega}{k} - \frac{1}{\omega m} \right) e^{i\frac{\pi}{2}} = \frac{\omega m - k/\omega}{km} e^{i\frac{\pi}{2}}.$$

В соответствии со следствием теоремы 1

$$\underline{x} = \frac{1}{\underline{b}} = \frac{km}{\omega m - k/\omega} e^{-i\frac{\pi}{2}}.$$

Фаза  $-i\pi/2 < 0$ , т.е. нагрузка приобрела упругий характер.

Аналогичным образом рассматривается условие

$$\underline{x}_m < \underline{x}_k.$$

Теорема доказана.

Применение комплексного представления позволило получить существенно более компактные алгебраические методы расчета механических систем с несколькими степенями свободы в установившихся режимах по сравнению с классическими методами, основанными на составлении и интегрировании дифференциальных уравнений высоких порядков. При этом объем вычислений сокращается в несколько раз. Ключевую роль в предложенном методе играют механические реактанс, резистанс и импеданс для параллельного соединения потребителей механической мощности и сасептанс, кондактанс и адмитанс – для последовательного. Построение векторных диаграмм амплитуд сил, скоростей и их составляющих в комплексной плоскости для нулевого момента времени дает наглядное представление о фазовых соотношениях между этими величинами и их взаимосвязи.

## Литература

1. Бабаков, И. М. Теория колебаний / И. М. Бабаков. – 4-е изд., испр. – Москва : Дрофа, 2004. – 591 с.
2. Анализ нелинейной динамики процесса многорезцового точения «по следу» / А. М. Гуськов, М. А. Гуськов, Динь Дык Тунг, Г. Я. Пановко // Машиностроение. – 2018. – № 2 (55). – С. 9–16.
3. Царенко, С. Н. Крутильные колебания стержневых конструкций с осевой неоднородностью геометрических характеристик / С. Н. Царенко – DOI: 10.14529/mmph190107 // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. – 2019. – Т. 11, № 1. – С. 50–58.
4. Буланчук, П. О. Вибрационная энергия и управление маятниковыми системами / П. О. Буланчук, А. Г. Петров // Прикладная математика и механика. – 2012. – Т. 76, Вып. 4. – С. 550–562.
5. Попов, И. П. Исследование резонансов в технических системах / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 2 (4). – С. 15–18.
6. Попов, И. П. Синтез инертно-инертного осциллятора / И. П. Попов // Прикладная математика и вопросы управления. – 2017. – № 1. – С. 7–13.
7. Нейтрализация механического инертного реактанта основной гармоники в двигателях внутреннего сгорания / И. П. Попов, Д. П. Попов, С. Ю. Кубарева, Е. Ю. Блынских // Проблемы и перспективы развития автомобильного транспорта : материалы международной научно-практической конференции. – Курган : КГУ, 2013. – С. 82–87.
8. Попов, И. П. Вращательные инертно-емкостные устройства / И. П. Попов // Вестник Самарского государственного технического университета. Технические науки. – 2011. – № 3 (31). – С. 191–196.

9. Попов, И. П. Антирезонанс – резонанс скоростей / И. П. Попов. – <https://doi.org/10.17587/mau.20.362-366> // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2019. – Т. 20, № 6. – С. 362–366.

10. Попов, И. П. Механические аналоги реактивной мощности / И. П. Попов // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. – 2015. – № 3 (30). – С. 37–39.

*I.P. Popov*

## **STUDY OF FORCED OSCILLATIONS OF MECHANICAL SYSTEMS. PART 2**

The purpose of the study is to develop essentially compact methods for calculating mechanical systems with several degrees of freedom for steady states. Representation of harmonic quantities in the form of rotating vectors in the complex plane and operations with their complex amplitudes can greatly facilitate the calculation of arbitrarily complex mechanical systems under harmonic effects in the steady state.

Reactance, resistance, impedance, susceptance, conductance, admittance.



**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ  
С ФАЗЗИ-РЕГУЛЯТОРОМ**

Рассмотрены методы управления электроприводом перемещения подвешенного груза. Разработана модель объекта для реализации фаззи-регулятора. Рекомендуется в качестве входных переменных фаззи-регулятора задавать угол отклонения груза от вертикали и его угловую скорость при формировании требуемого переходного процесса.

Математический маятник, электрический привод, стабилизация, робастное управление, нечеткая логика.

Большинство объектов управления в автоматизированном электроприводе являются сложными электромеханическими системами. Это выражается в наличии ограничений не только на отдельные параметры и координаты движения, но и их нелинейные взаимосвязи. Анализ динамических процессов в них требует учета особенностей как в электрической части, так и в механике электропривода. Методы жестких настроек типовых регуляторов потребуют в этом случае синтеза достаточно сложных управляющих воздействий даже при существенных упрощениях математического описания процессов, происходящих в электромеханической системе, когда сама модель объекта не совсем адекватна реальной системе из-за принимаемых допущений. Методы, использующие применение устройств наблюдения и эталонных моделей [1], могут решить проблему оптимального управления, но в ограниченном диапазоне изменения параметров управляемого объекта. Кроме того, предлагаемые решения не всегда могут учесть изменяющиеся во времени параметры, начальные условия в объекте управления, соотношения отдельных параметров рассматриваемых систем.

Имеется большой класс автоматизированных электроприводов перемещения тележки с подвешенным к ней грузом. Путем рационального перемещения точки подвеса (тележки) этого груза за счет изменения скорости и ускорения, а в конечном итоге управляя усилием, приложенным к подвесу, можно управлять его колебаниями, т.е. ограничивать время и амплитуду отклонений груза от вертикали.

Известны подходы при решении подобных задач [2], основанные на применении фаззи-управления и различном математическом описании объекта управления. Анализ современных методов управления, с применением кроме классических регуляторов и различных идентификаторов нестационарных объектов, свидетельствует о целесообразности использования нечеткой логики. Особенно тогда, когда дифференци-

альные уравнения, описывающие работу электромеханической системы, являются существенно нелинейными и содержащими тригонометрические функции.

Настройка фаззи-регулятора заключается в том, что необходимо минимизировать количество его входов и выходов, а также вид и количество термов функций принадлежности. Сама настройка может быть осуществлена в режиме off-line, а затем проверена на реальном объекте. Для этого необходимо создать модель, адекватную реальному объекту.

В [2] предлагается модель в виде передаточной функции  $W_{гр}(p)$  от скорости точки подвеса  $v_{тп}(p)$  к отклонению груза от положения равновесия  $\varphi(p)$ :

$$W_{гр}(p) = \frac{\varphi(p)}{v_{тп}(p)} = \frac{Kp}{(T_1 p)^2 + T_2 p + 1},$$

где  $K$  зависит от конструкции механизма;  $T_1 = \sqrt{\frac{l_{п}}{g}}$ ,  $T_2 = \frac{K_{св} l_{п}}{m_{гр} g}$ ;  $l_{п}$  – длина подвеса;  $K_{св}$  зависит от скорости ветра;  $m_{гр}$  – масса груза.

Такое описание не позволяет исследовать влияния соотношения масс тележки и перемещаемого груза на параметры частоты и амплитуды колебаний. Кроме того, здесь предлагается синтезировать управляющее воздействие. Оно получается достаточно сложным в реализации в том случае, если в процессе работы электропривода изменяются его внутренние параметры.

В [1] предлагается модель в виде нелинейных дифференциальных уравнений, полученных на основании решения уравнений Лагранжа:

$$\alpha'' + \frac{m_2}{m_1} \alpha'^2 \sin \alpha \cos \alpha + \frac{m_1 + m_2}{m_1} \frac{g}{l} \sin \alpha = \frac{F_{п} \cos \alpha}{m_1 l},$$

где  $\alpha$  – угол отклонения от вертикали;  $m_1$  и  $m_2$  – соответственно масса тележки и груза;  $l$  – длина подвеса;  $F_{п}$  – усилие, прикладываемое к тележке.

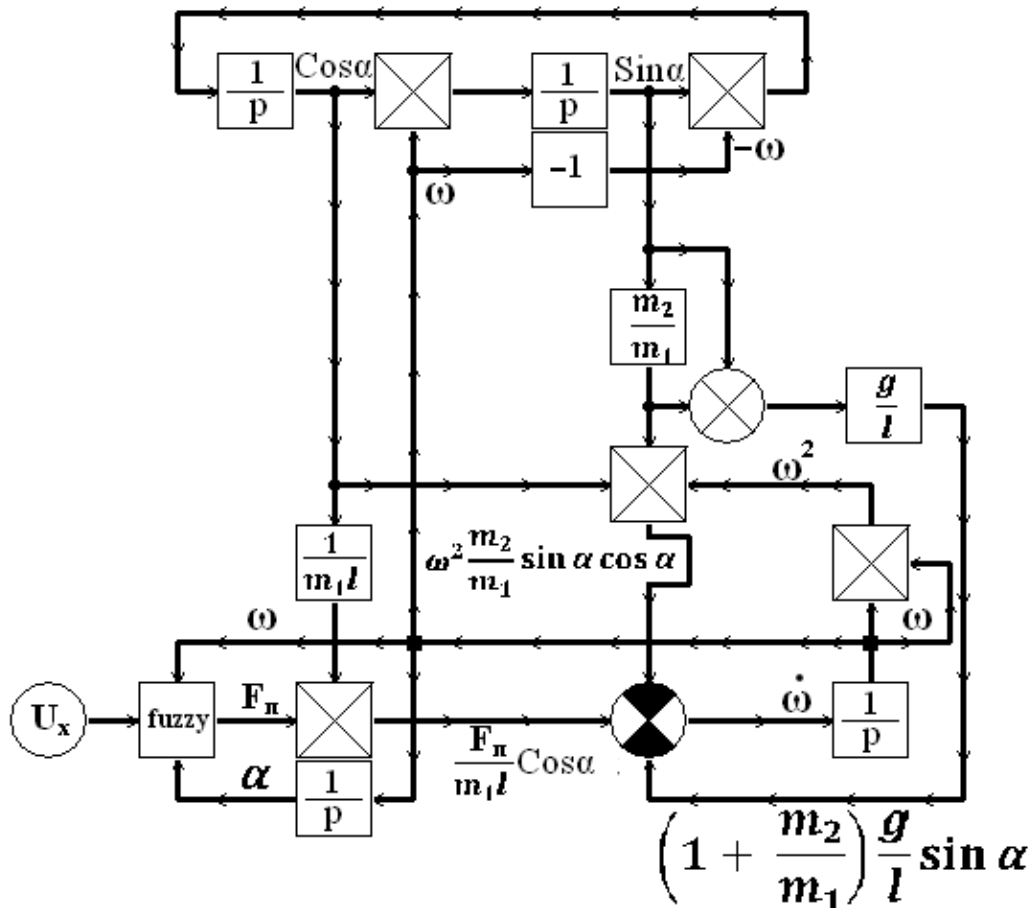


Рис. Структурная схема модели нестационарного объекта

Эта математическая модель получена с учетом ряда допущений:

- механическая передача от двигателя к тяговому органу жесткая;
- масса подвешенного груза сосредоточена в точке, совпадающей с ее центром тяжести;
- гибкая подвеска, связывающая тяговый орган и груз, является безынерционной и абсолютно жесткой.

В этом случае применяется нечеткое управление, позволяющее оптимизировать диаграмму разгона и торможения механизма перемещения груза, минимизируя время и амплитуду успокоения колебаний груза и при этом обеспечивая максимальную производительность работы взаимосвязанных электроприводов. Рассматриваемая модель предполагает использование датчика угла отклонения и угловой скорости вращения массы перемещаемого груза (входные переменные), а в качестве выходного параметра фаззи-регулятора – задание на усилие, прикладываемое к массе тележки.

На рисунке приведена структурная схема модели формирования требуемого усилия, создаваемого электроприводом, чтобы минимизировать время успокоения перемещаемого груза.

В предлагаемой модели управления электроприводом перемещения груза на подвесе применяем также фаззи-регулятор для настройки в режиме off-line. При этом возможна оптимизация термов функций принадлежности при различных соотношениях

масс груза и тележки, длины подвеса. Используется робастный подход к выработке управляющего воздействия.

Анализ применения фаззи-управления усилием  $F_\pi$  механизма перемещения груза с гибкой подвеской показал, что используя два параметра электромеханической системы (угол отклонения груза от вертикали  $\alpha$  и угловую скорость отклонения  $\omega$ ) в качестве входных функций принадлежности, можно восстановить вертикальное положение маятника без перерегулирования за время, меньшее полупериода колебаний. При этом возможен выбор оптимальных термов, чтобы при различных соотношениях масс  $m_1$  и  $m_2$ , а также различной длине  $l$  подвеса было обеспечено минимальное время успокоения.

Термы функций принадлежности фаззи-регулятора целесообразно принять треугольного вида. А их количество для каждой переменной исследовалось от 3 до 5. Выходной сигнал fuzzy подается в контур тока, чтобы управлять необходимым ускорением движения точки подвеса. Моделирование и исследование в режиме off-line возможны с использованием любого пакета прикладных программ, имеющего Simulinki FZ-logic.

### Литература

1. Терехов, В. М. Системы управления электроприводов : учебник для студентов высших учебных за-

ведений / В. М. Терехов, О. И. Осипов ; под редакцией В. М. Терехова. – Москва : Академия, 2005. – 304 с.

2. Рассудов, Л. Н. Электроприводы с распределенными параметрами механических элементов /

Л. Н. Рассудов, В. Н. Мяздель. – Ленинград : Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1987. – 144 с.

*V.N. Bakaev*

### **MODELLING OF CONTROL SYSTEM OF ELECTRIC DRIVE WITH FUZZY REGULATOR**

The methods of controlling the electric drive of moving suspended loads are considered. A model of the object for the implementation of the fuzzy controller is developed. It is recommended to set the angle of deviation of the load from the vertical and its angular velocity as the required transition process as input variables of the fuzzy controller.

Mathematical pendulum, electric drive, stabilization, robust control, fuzzy logic.



*Д.А. Кудряшов, А.А. Суколицков*  
Вологодский государственный университет

## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ СОРТИРОВКИ ПИЛОМАТЕРИАЛА

В работе оценивается возможность автоматического распознавания качества досок с помощью машинного зрения. Проанализированы возможные факторы, влияющие на сортировку различных видов досок, а также предложена схема устройства сортировки.

Автоматизированная система сортировки, классификация, доска.

В современных условиях работа по сортировке деревянных досок осуществляется сотрудниками без применения специализированных приборов, исключительно визуально. Такое классифицирование не может быть точным: оно сопровождается значительным разбросом в оценках разными людьми и низкой производительностью. Все эти факторы влекут за собой неверную классификацию продукции, что в дальнейшем негативно отражается на репутации предприятия.

Целью работы является сведение к минимуму участия человека в процессе сортировки досок за счет разработки автоматизированной системы на основе искусственного интеллекта.

Система должна определять видимые и геометрические дефекты. Для распределения продукции рассмотрены признаки сортности досок в соответствии с ГОСТ 2140-81 «Видимые пороки древесины, классификация, термины и определения, способы измерения» [1]. Основные дефекты: сучки; отверстия от выпавших сучков; грибные ядовитые пятна и полосы; ядровая и бурая гниль; трещиноватая гниль; наружная

трухлявая гниль; смоляные карманы; боковые, торцевые и продольные трещины; продольная и поперечная покоробленность; покоробленность по кромке; химическая окраска; следы от насекомых; растрескивания и деформация; последствия нарушений формы ствола; изъяны строения древесины; естественные (нормальные) отложения древесины; дефекты обработки и транспортировочные повреждения.

Сучки являются самым частым пороком древесины. Вероятность встретить ствол, полностью их лишенный, крайне мала. Сучковатость зависит от породы дерева, условий места произрастания, полноты насаждения и многих других факторов. Разновидность сучков представлена на рисунке 1 и включает в себя 9 основных групп.

Сучки оказывают негативное влияние на качество древесины. Нарушают её однородность и ухудшают механические свойства. Наличие сучков затрудняет обработку и влечет за собой неоднородное изнашивание. Сучки напрямую влияют на степень сортности, которая зависит от их разновидности, размеров, количества и расположения на материале.

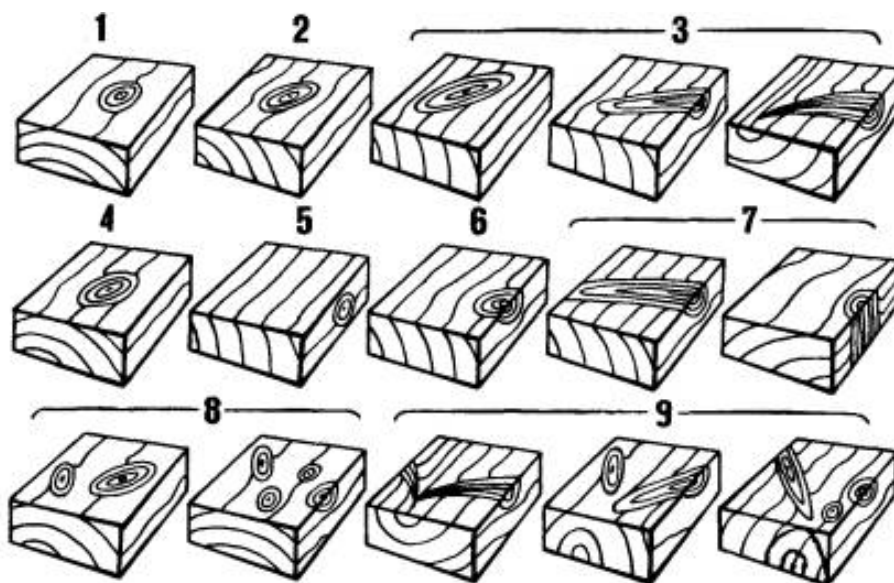


Рис. 1. Разновидности сучков:

1 – круглый; 2 – овальный; 3 – продолговатый; 4 – пластевой; 5 – кромочный; 6 – ребровой; 7 – шпильной; 8 – групповые; 9 – разветвленные

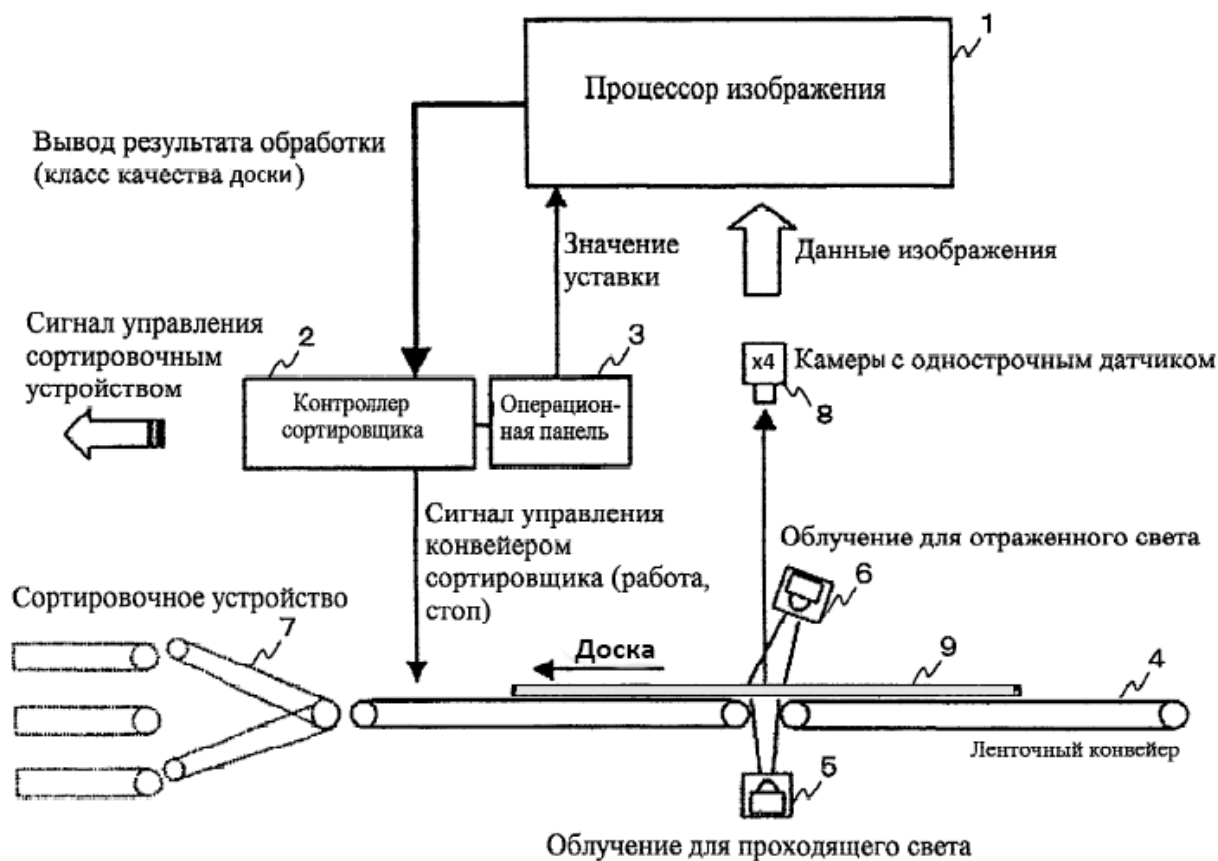


Рис. 2. Схема устройства сортировки

Для реализации процесса сортировки необходимо сконструировать и настроить оборудование. Схема прибора представлена на рисунке 2.

Доска перемещается по ленточному конвейеру (4), попадает в зону обзора камер (8). Средство обработки изображения (1) получает цветное распределение цветного изображения, захваченного камерой, сравнивает параметры цветного распределения с заранее определенными параметрами распределения цветов для нормального пиломатериала, оценивает полученное цветное распределение как аномальное (в случае его отклонения от нормального на определенную величину) и определяет в качестве дефекта зону на поверхности доски. Алгоритм нейронной сети проводит классифицирование доски в ту или иную группу и посылает доску в сортировочное устройство (7).

На российском рынке существуют аналоги изобретения. Одним из них является продукт RuScan компании «АВТОМАТИКА-ВЕКТОР» [2]. Это комплексная система, выполняющая сканирование пиломатериалов, поиск дефектов, управление сортировкой, торцовкой и отбраковкой в автоматическом режиме. Конструкция состоит из двух или трех рам, на которых установлены камеры и светодиодные прожекторы. Камеры располагаются как сверху конвейера, так и снизу, что позволяет производить оценку поверхности сразу с двух сторон без разворота доски. Также для измерения размеров доски используются скоростные лазерные датчики, которые передают ин-

формацию на главный компьютер через цифровую сеть без потерь точности измерений.

Шведский аналог – устройство WoodEye [3] – рекомендовало себя на мировом рынке и сотрудничает со множеством компаний. Система имеет три пакета ПО, предназначенных для оптимизации поперечной торцовки досок, для оценки и сортировки пиломатериалов, для контроля за качеством паркетных и иных покрытий для пола. Система оснащается черно-белыми или цветными сенсорами высокого разрешения. С их помощью определяются положение дефекта и его контур. Система позволяет выявить большинство стандартных дефектов древесины: сучки, трещины, неровности, гниль. Кроме того, к устройству могут быть дополнительно подключены наружные сенсоры для создания рентгеновского изображения материала, сортировки по прочности, определения влажности древесины, покоробленности и т.д.

Для корректной работы создаваемой системы необходимо провести анализ и настройку имеющегося оборудования; выделить классы сортировки в соответствии со стандартами и ГОСТ в этой сфере; изучить имеющееся программное обеспечение, выбрать или модернизировать существующие алгоритмы потоковой классификации. На данный момент рассматриваются алгоритмы Виолы-Джонса, CUDA, MachineLearning. На заключительном этапе необходимо провести исследования, научные эксперименты для выявления, насколько точно будет выполняться классификация досок.

### **Литература**

1. Gosthelp ГОСТ 2140-81 : официальный сайт. – URL: <http://www.gosthelp.ru/text/gost214081vidimuyeporokidr.html> (дата обращения: 28.11.2019). – Текст : электронный.
2. Автоматика-Вектор : официальный сайт. – URL: <http://a-vektor.ru/> (дата обращения: 28.11.2019). – Текст : электронный.
3. WoodEye : официальный сайт. – URL: <https://woodeye.com> (дата обращения: 28.11.2019). – Текст : электронный.

***D.A. Kudryashov, A.A. Sukonshchikov***

### **DEVELOPMENT OF AUTOMATED TIMBER GRADING SYSTEM**

The paper evaluates the possibility of automatic recognition of the quality of boards using machine vision. Possible factors affecting the sorting of various types of boards are analyzed, and a scheme for a sorting device is proposed.

Automated system, grading, classification, board.



## ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ ОРГАНИЗАЦИИ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Рассмотрены вопросы безопасности дорожного движения пешеходов и меры по снижению ДТП среди населения с точки зрения аналитики. Предложены варианты для алгоритмов и математических моделей по организации безопасности дорожного движения.

Безопасность, цепи Маркова, транспортные потоки.

В настоящее время организация безопасности дорожного движения является крайне сложной и важной задачей. Ввиду высокой аварийности на конкретных участках дорог и перекрестках появилась необходимость прогнозирования параметров дорожного движения. Современный анализ дорожной обстановки сводится к сбору данных и простейшему приведению формул по техническим средствам обеспечения безопасности дорожного движения. При этом существует ключевая проблема, а именно – отсутствие максимально приближенной к реальной ситуации математической модели.

Современные математические модели, используемые в организации дорожного движения, сводятся к статистическому сбору информации и обобщению усредненных значений, которые в дальнейшем используются в формулах. В данной работе сделана попытка максимально приблизить к действительным параметрам математической модели, используя аналитический подход к решению задач организации дорожного движения. В первой части используются цепи Маркова в приложении к вероятностям расположения участников дорожного движения на проезжей части [1]. Во второй части, на основании общепринятой гидродинамической модели [2], сделаны попытки ликвидировать допущения, а также внести дополнительные параметры, способные учесть реальные ситуации на дороге (опережение одного транспортного средства другим при наличии свободного пространства, нарушение ПДД участниками движения, внезапно возникшие препятствия). В третьей части приведена проверка математической модели, с учетом постановки данных, как задачи с приближенно заданными параметрами [3]. Там же проверена рациональность текущей модели, сведения частного закона к общему для всего исследуемого участка проезжей части, адаптировано решение соответствующего интегрального уравнения и сделана попытка получения закона, сводящегося к численному решению и алгоритмизации.

Моделирование процессов, происходящих на участке проезжей части, крайне сложная, с аналитической точки зрения, задача. Применение теории цепей

Маркова с использованием ячеечной модели изложено в [4].

Ячеечная модель актуальна при рассмотрении участников дорожного движения и их расположения на проезжей части как совокупности ячеек, перемещающихся в системе (на конкретном участке). Однако в данном случае возникает проблема нелинейности цепей Маркова ввиду необходимости моделирования положений самих ячеек, что, в свою очередь, требует составления каждый раз новой матрицы переходных вероятностей. Для дальнейших разработок алгоритмов математических расчетов параметров дорожного движения и выбора технических средств требуется максимально упрощенная система вероятностей и параметров изменений состояний.

Для преодоления данной трудности использован особый подход, в котором определяются все возможные положения и состояния всех участников движения. Благодаря ему получаем возможные состояния (положения) ячеек. Их состояния (положения) переходят из одной ячейки в другую. Таким образом, можно перейти к варианту рассмотрения виртуального перемещения ячеек и тем самым избавиться от нелинейности цепей Маркова.

Предположим, что участники дорожного движения перемещаются с интенсивностью  $\varphi > 0$ , при этом длительности изменения положения независимы друг от друга, имеется в виду существование факта одинакового распределения с функцией  $F(x)$ .

Пусть  $X_t$  – состояние системы в момент времени  $t$ , тогда получим

$$P(\tau_t = k) = \int_0^{\infty} (\varphi \varepsilon)^k k^{-1} \exp[-\varphi \varepsilon] dF(\varepsilon), \quad (1)$$

где  $\tau_t$  – количество преобразований состояния ячеек, т.е. наличия или отсутствия в них частиц (объектов).

Таким образом, получаем цепь Маркова, выраженную стохастической последовательностью

$$\{X_0, X_1, \dots\}.$$

Естественным будет условие, что все процессы перехода будут обладать характерной дискретностью в пространстве и во времени. Логичным также будет

утверждение, что частица (объект) может приниматься только одной из  $m$ -ячеек, т.е. находиться только в состоянии, которое ей соответствует.

Далее вводим понятие переходной вероятности

$$P \{X_n = m \mid X_{n-1} = x\} = p(x, m). \quad (2)$$

Для каждого состояния переходная вероятность выражается рекуррентно по следующим формулам:

$$p_0(x) = P\{X_0 = x\} - \text{начальное состояние;}$$

$$p_n(x) = P\{X_n = x\} = \sum_{m \in E} p_0(m) p_n(m, x),$$

где  $p$  – шаговые переходные вероятности.

Для примера, переходные вероятности первого и  $n$ -состояния будут выражены законами:

$$p_1(m, x) = p(m, x), \quad (3)$$

$$p_n(m, x) = \sum_{m_1 \in E} p(m, m_1) p_{n-1}(m_1, x).$$

Для дальнейшего выражения матрицы переходных вероятностей необходимо ввести несколько уточнений. Во-первых, множество  $E$  образует цепь Маркова, а его точки (значения) – состояния цепи Маркова. Во-вторых, ряд вероятностей, при переходе от 0 до  $n$ , будут иметь значения 0. Это обусловлено учетом конкретных параметров и положений ячейки на данном шаге. Итак, мы переходим к матрице переходных вероятностей. Она будет иметь вид

$$X = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & \dots & m_{1k-1} & m_{1k} \\ 0 & m_{22} & m_{23} & \dots & m_{2k-1} & m_{2k} \\ 0 & 0 & m_{33} & \dots & m_{3k-1} & m_{3k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & m_{k-1k-1} & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & m_{kk} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Следует отметить, что цепь Маркова имеет важные свойства. Одним из них и, пожалуй, решающим является наличие ненулевой вероятности попадания из одного состояния в другое. В свою очередь попадание может выражаться как в качестве непосредственного попадания, так и в качестве возвращения из одного состояния в другое.

Таким образом, мы сталкиваемся с необходимостью определения вероятностей попадания и возвращения в матрице переходных вероятностей хотя бы для первого попадания.

Возьмем случайные величины  $\tau_x$  такие, что

$$\tau_x = \inf\{n \geq 1: X_n = x\}, x \in E$$

соответственно, имеем вероятности:

$$f_{x,x}^{(n)} = P\left(\{\tau_x = n\} / \{X_0 = x\}\right) - \text{вероятность первого возвращения в состояние } x \text{ на } n\text{-шаге;}$$

$$f_{x,m}^{(n)} = P\left(\{\tau_m = n\} / \{X_0 = x\}\right) - \text{вероятность первого попадания в состояние } m \text{ на } n\text{-шаге.}$$

Таким образом, мы можем получить выражение для вероятности попадания, рано или поздно, в состояние  $m$  из состояния  $x$ :

$$f_{x,m} = \sum_{n=1}^{\infty} f_{x,m}^{(n)}. \quad (5)$$

При вероятности равной единице можно классифицировать переходную матрицу как возвратную. Если же вероятность будет меньше единицы, то – как невозвратную.

Также следует определить и среднее время возвращения в состояние  $x$  из любого состояния  $m$ , если это возможно,

$$\mu_x = \left(\sum_{n=1}^{\infty} n f_{x,x}^{(n)}\right)^{-1}. \quad (6)$$

Подводя итог первой части работы, мы не можем не сделать одного простого, но крайне полезного замечания:

$$P_x\{X_n \in A\} = P_n(x, A),$$

что и является вероятностным смыслом переходных состояний системы за  $n$ -шагов.

Переходя ко второй части работы, а заодно и к реальному транспортному потоку, укажем, что для современности характерно использование гидродинамической модели, а именно уравнения неразрывности жидкости и кинетических уравнений жидкости. Выбор именно такой аналогии вполне обоснован: реальный транспортный поток представляет собой поток жидкости,двигающийся с определенными параметрами. Но, как в рассмотрении потока жидкости с позиции гидравлики, так и транспортного потока с учетом данной модели, приходится сталкиваться с рядом трудностей и допущений. Следует понимать, что отдельные участники дорожного движения (как и частицы жидкости) могут отходить от начально положенной схемы и параметров движения. Для устранения столь существенных упущений проведена попытка рассмотреть данные уравнения с позиции тензорного исчисления и получить дополнительные и крайне важные параметры [5].

Приведем уравнения, используемые в общепринятой практике, обозначающие гидродинамическую модель:

$$\partial_t f + \partial_x(fu) = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{inf} + \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{rel}, \quad (7)$$

$$\partial_t \rho + \partial_x(\rho V) = 0,$$

$$\vartheta(x, t) = \vartheta_\varepsilon(\rho(x, t)).$$

Теперь можно перейти к рассмотрению данных уравнений с позиции тензорной алгебры. Как известно, тензор позволяет учесть не только собственные действия объекта, но и воздействия (в том числе ответные) на него внешних факторов или иных объектов. Это возможно благодаря основному свойству тензоров: линейно преобразовывать элементы одной системы (пространства) в линейные элементы другой системы.

В таком случае уравнение механики сплошных сред имеет вид

$$\rho \left(F - \frac{d\vartheta}{dt}\right) + \text{div } \Pi = 0, \quad (8)$$

где  $\Pi$  – тензор напряжений.

Тензор  $\Pi$  имеет в декартовых координатах следующие составляющие:

$$P_{y_i y_i} = -p + 2\mu \frac{\partial \vartheta_{y_i}}{\partial y_i} + \lambda \operatorname{div} \vartheta, \quad (9)$$

$$P_{y_i y_k} = \mu \left( \frac{\partial \vartheta_{y_i}}{\partial y_i} + \frac{\partial \vartheta_{y_k}}{\partial y_k} \right),$$

где  $\lambda$ ,  $\mu$  – коэффициенты вязкости.

Следует сказать, что

$$\operatorname{div} \vartheta = \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \left( \frac{\partial H_2 H_3 \vartheta_{x^1}}{\partial x^1} + \frac{\partial H_3 H_1 \vartheta_{x^2}}{\partial x^2} + \frac{\partial H_1 H_2 \vartheta_{x^3}}{\partial x^3} \right).$$

Далее нам необходимы компоненты, а именно вектор скорости и его компоненты, вектор ускорения и его компоненты и расхождение вектора.

$$\vartheta^i = \frac{\partial x^i}{\partial t},$$

$$w_{y^i} = \frac{\partial \vartheta_{y^i}}{\partial x} + \vartheta_{y^k} \frac{\partial \vartheta_{y^i}}{\partial y_k}.$$

Затем мы введем ковариантные составляющие в уравнение механики сплошной среды

$$\rho \left( \frac{\partial \vartheta^i}{\partial t} + \vartheta^2 \nabla_s \vartheta^i \right) = \rho F_k - \frac{\partial p}{\partial x^k} + \mu \nabla_i (\nabla_k \vartheta^i + \nabla^i \vartheta_k) \quad (10)$$

$$\nabla_k \vartheta^i = \frac{\partial \vartheta^i}{\partial x^k} + \vartheta^\lambda \Gamma_{\lambda k}^i.$$

Далее воспользуемся формой смешанных составляющих тензора  $\Pi$  и получим:

$$p_k^i = -\rho g_k^i + \mu (\Pi_k \vartheta^i + \nabla^i \vartheta_k) \quad (11)$$

$$\nabla_k \vartheta^i = \frac{1}{H_i} \frac{\partial \vartheta_{x^i}}{\partial x^k} - \frac{\vartheta_{x^k}}{H_i^2} \frac{\partial H_k}{\partial x^i} + \delta_k^i \sum_{\lambda=1}^3 \frac{\vartheta_{x^\lambda}}{H_\lambda} \frac{\partial \ln H_i}{\partial x^\lambda}.$$

Затем мы можем найти физические составляющие вектора ускорения. Они будут иметь вид:

$$w_{x^i} = \frac{\partial \vartheta_{x^i}}{\partial t} + \sum_{k=1}^3 \frac{\vartheta_{x^k}}{H_k} \frac{\partial \vartheta_{x^i}}{\partial x^k} - \sum_{k=1}^3 \frac{\vartheta_{x^k}^2}{H_i H_k} \frac{\partial H_k}{\partial x^i} + \sum_{k=1}^3 \frac{\vartheta_{x^k} \vartheta_{x^i}}{H_k H_i} \frac{\partial H_i}{\partial x^k}.$$

Наконец, получим физический составляющий тензора  $\Pi$ , без которого невозможно дальнейшее решение

$$\tau_{ik} = \mu \left\{ \frac{1}{H_k} \frac{\partial \vartheta_{x^i}}{\partial x^k} + \frac{1}{H_i} \frac{\partial \vartheta_{x^k}}{\partial x^i} - \frac{1}{H_i H_k} \left[ \vartheta_{x^i} \frac{\partial H_i}{\partial x^k} + \vartheta_{x^k} \frac{\partial H_k}{\partial x^i} \right] + 2\delta_k^i \sum_{\lambda=0}^3 \frac{\vartheta_{x^\lambda}}{H_\lambda} \frac{\partial \ln H_i}{\partial x^\lambda} \right\}.$$

После соответствующих преобразований получим окончательный вид уравнения гидромеханики вязкой несжимаемой жидкости для любой системы координат (криволинейных, ортогональных и т.д.)

$$\rho \left( \frac{\partial \vartheta_{x^i}}{\partial t} + \sum_{k=1}^3 \frac{\vartheta_{x^k}}{H_k} \frac{\partial \vartheta_{x^i}}{\partial x^k} - \sum_{k=1}^3 \frac{\vartheta_{x^k}^2}{H_i H_k} \frac{\partial H_k}{\partial x^i} + \sum_{k=1}^3 \frac{\vartheta_{x^k} \vartheta_{x^i}}{H_k H_i} \frac{\partial H_i}{\partial x^k} \right) = \rho F_{x^i} - \frac{1}{H_i} \frac{\partial p}{\partial x^i} + \frac{1}{H_i} \sum_{k=1}^3 \left\{ \frac{1}{H_1 H_2 H_3} \frac{\partial}{\partial x^k} \left( \frac{H_1 H_2 H_3}{H_k} \tau_{ik} \right) - \tau_{ik} \frac{\partial \ln H_i}{\partial x^\lambda} \right\}.$$

Теперь уже мы можем получить уравнение неразрывности с учётом составляющих векторов и тензо-

ров, используя, преимущественно, коэффициенты Ламэ

$$\frac{\partial(\vartheta_{x^1} H_2 H_3)}{\partial x^1} + \frac{\partial(\vartheta_{x^2} H_1 H_3)}{\partial x^2} + \frac{\partial(\vartheta_{x^3} H_2 H_1)}{\partial x^3}.$$

Таким образом, с учётом элементов векторного анализа и тензорного исчисления мы смогли решить и дополнить существующую идею гидродинамических моделей транспортных потоков. В свою очередь, благодаря использованию составляющих векторов, мы смогли уйти от ряда существенных допущений и тем самым учесть возможные изменения параметров и законов движения отдельных субъектов дорожного движения в рассматриваемом транспортном потоке (участке проезжей части, перекрёстке). А использование контравариантных составляющих векторов кладет начало новым и более совершенным макроскопическим моделям транспортных потоков, так как берутся во внимание различные постановки системы координат.

Третья часть нашей работы. На данном этапе рассматривается приведение частного, приближенно взятого закона движения к общему закону для всего участка (перекрестка), отвечающему требованиям численного моделирования. Для решения поставленной задачи использованы элементы операционного исчисления и сведены решения поставленных уравнений (законов) к численным решениям интегральных уравнений.

Для дальнейшего решения необходимо отметить, что мы будем пользоваться теорией решения некорректных и обратных задач. Кстати говоря, именно обратную задачу мы перед собой и ставим: от частного (конкретного) закона мы идем к закону всего участка. Следует понимать, что преимущественная часть теории некорректных и обратных задач завязана на операционном исчислении как ходовом в специальных главах теории вероятностей и методов оптимизации.

Примем условие, что имеется задача, поставленная в приближенно заданных значениях. А это значит, что необходим один из самых уникальных и комплексных подходов – метод регуляризации Тихонова.

Возьмём за условие операционное уравнение первого рода:

$$A^0 z = u^0, z \in Z.$$

При этом будем иметь в виду, что в гильбертовом пространстве  $Z$ ,  $U$  задают данное уравнение линейный ограниченный оператор и элемент, такие, что:

$$A^0: Z \rightarrow U, \quad u^0 \in Z.$$

Несложно заметить, что при  $z^0 \in Z$ , которое в свою очередь являлось единственным решением, мы бы легко свели задачу к следующему этапу. Однако необходимо понимать, что в операционном исчислении и методах регуляризации играют важную роль согласования операторов. В данном случае мы можем обнаружить проблему согласования параметра регуляризации с ошибками задания. Нам же необходимо свести все отклонения к точному решению  $z^0$ .

Запишем для наглядности известный всем функционал Тихонова, где  $\alpha$  – параметр регуляризации

(всегда больше нуля), при этом параметр является фиксированным:

$$M^\alpha(Z) = \|A^h z - u^\delta\|^2 + \alpha \|z\|^2, z \in Z. \quad (12)$$

Для этого воспользуемся не менее популярным и очень важным регуляризирующим алгоритмом – методом обобщенной невязки. Данный метод очень важен в методе регуляризации Тихонова, т.к. дает нам возможность учесть реальные параметры, а именно, что ошибка приближения не стремится к нулю и не является фиксированной величиной [6].

Ведя дальнейшие вычисления, определим следующие функции а:

$$\begin{aligned} \phi_\eta(\alpha) &\equiv M^\alpha(z_\eta^\alpha) \equiv \|A^h z_\eta^\alpha - u^\delta\|^2 + \alpha \|z_\eta^\alpha\|^2, \\ \beta_\eta(\alpha) &\equiv \|A^h z_\eta^\alpha - u^\delta\|^2, \gamma_\eta \equiv \|z_\eta^\alpha\|^2. \end{aligned}$$

Определим меру несовместности уравнения:

$$\mu_\eta(u^\delta, A^h) \equiv \inf_{z \in Z} \|A^h z - u^\delta\|$$

Затем внесём предположение, что она вычисляется с согласованной погрешностью  $k$ , тогда выполняются неравенства:

$$\begin{aligned} \mu_\eta(u^\delta, A^h) &\leq \mu_\eta^k(u^\delta, A^h) \leq \mu_\eta(u^\delta, A^h) + k, \\ k(\eta) &= h + \delta. \end{aligned}$$

Далее используем интегральное уравнение Фредгольма первого рода. Сразу требуется внести уточнение, что используется метод регуляризации Тихонова и обобщенной невязки.

$$A^0[z](x) = \int_a^b K^0(x, s)z(s)ds = u^0(x), c \leq x \leq d$$

В нашем случае вместо конкретного уравнения мы имеем его приближение:

$$A^h[z](x) = \int_a^b K^h(x, s)z(s)ds = u^\delta(x), c \leq x \leq d.$$

Для дальнейшего решения нам необходимо привести следующие оценки:

$$\begin{aligned} \|u^\delta - u^0\| &\leq \delta, \|K^h - K^0\|_{L_2(\Pi)} \leq h, \\ \|A^h - A^0\| &\leq h. \end{aligned}$$

Запишем очевидную оценку для дальнейшего решения интегрального уравнения, которая в свою очередь служит в качестве оценки для разности норм операторов:

$$\begin{aligned} \|A^h - A^0\|^2 &= \sup_{\|z\| \leq 1} \|(A^h - A^0)z\|^2 \\ &= \sup_{\|z\| \leq 1} \int_c^d \left( \int_a^b (K^h(x, s) - K^0(x, s))z(s)ds \right)^2 dx \\ &\leq \sup_{\|z\| \leq 1} \int_c^d \left( \int_a^b (K^h(x, s) - K^0(x, s)) \right)^2 ds dx \int_a^b z^2(s)ds \\ &\leq \int_c^d \int_a^b (K^h(x, s) - K^0(x, s))^2 ds dx \leq h^2. \end{aligned}$$

Задача минимизации для выбранного операторного уравнения имеет вид

$$\Phi_\eta(z) = \int_c^d \left( \int_a^b K^h(x, s)z(s)ds - u^\delta(x) \right)^2 dx \rightarrow \min. \quad (13)$$

Для дальнейшего приведения к удобному для численного решения виду, получим дискретный конечно-разностный аналог вышеуказанного функционала, то есть:

$$\Phi_\eta(z) \equiv \sum_{i=1}^m \left[ \sum_{j=1}^n \widehat{K_{i,j}^h} z_j h_j - u_i^\delta \right]^2 h_x.$$

Для нахождения конечного, удобного для нас, выражения, в качестве исходного множества возьмем компакт, и тем самым за дискретный конечно-разностный аналог мы можем принять множество:

$$M \downarrow_C \equiv \left\{ z: z \in R^n \begin{cases} z_{i-1} - 2z_i + 2z_{i+1} \leq 0 & i = 2, \dots, n-1 \\ z_{i+1} - z_i \leq 0 & i = 1, \dots, n-1 \\ 0 \leq z_i \leq C & i = 1, \dots, n \end{cases} \right\}.$$

Таким образом, нами получено конечное множество в единой цепи преобразований для получения численных значений параметров дорожного движения. В работе были представлены вероятностные расчёты и переходные вероятности положения (состояния) участников дорожного движения для любого исследуемого участка (перекрестка). Также была усовершенствована и адаптирована для задач организации безопасности дорожного движения и принятая для моделирования транспортных потоков гидродинамическая модель. В конечном итоге была сделана попытка свести интегральное уравнение для обобщения закона для исследуемого участка с учетом наклонности на численное моделирование и исчисление. Следует заметить, что уникальность работы состоит в постановке задачи интегрального уравнения Фредгольма первого рода как задачи операционного исчисления с учетом неточно и приближенно заданной информацией. С позиции некорректных и обратных задач была проведена регуляризация методом Тихонова и методом обобщенной невязки. Опять же, необходимо указать, что были сделаны уточнения насчет наличия ошибки согласования, которая в свою очередь не стремится к нулю, а это уже позволяет нам учитывать реальные параметры дорожной обстановки.

Данная работа – фундаментальное начало для алгоритмов и математических моделей по организации безопасности дорожного движения. Текущие модели, множества и функционалы можно расширить и адаптировать для различных частных (конкретных) ситуаций и параметров дорожной обстановки. Дальнейшее развитие данной тематики будет направлено на построение единого алгоритма для получения численных параметров дорожного движения.

## Литература

1. Зорин, А. В. Введение в общие цепи Маркова : учебно-методическое пособие / А. В. Зорин. – Нижний Новгород : Нижегородский университет, 2013. – 51 с.
2. Хейт, Ф. Математическая теория транспортных потоков / Ф. Хейт. – Москва, 1966. – 286 с.

заданной информацией : учебно-методический материал / М. И. Сумин; Нижний Новгород : Нижегородский университет, 2017. – 120 с.

4. Калашников, В. В. Качественный анализ поведения сложных систем методом пробных функций / В. В. Калашников. – Москва : Наука, 1978. – 248 с.

5. Кочин, Н. Е. Векторное исчисление и начала тензорного исчисления / Н. Е. Кочин. – Москва : Наука, 1965. – 420 с.

6. Боровков, А. А. Эргодичность и устойчивость случайных процессов / А. А. Боровков. – Москва : Эдиториал УРСС, 1999. – 440 с.

*K.S. Lukin, N.V. Kurilova*

#### **INFORMATION AND ANALYTICAL APPROACHES TO SOLVE PROBLEMS OF ROAD SAFETY ORGANIZATION**

The issues of pedestrian traffic safety and measures to reduce accidents among the population from the point of view of analytics are considered. Options for algorithms and mathematical models for the organization of road safety are proposed.

Safety, Markov chains, traffic flows.



**РАЗРАБОТКА WEB-СИСТЕМЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ  
ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ НА ОСНОВЕ АППАРАТА  
АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ G-СЕТЕЙ ПЕТРИ**

В статье рассматриваются вопросы построения моделей агентно-ориентированных G-сетей Петри с использованием Web-системы. Представлен внешний вид интерфейса программы и примеры настройки его элементов. Предложенная Web-система позволит проектировать крупномасштабные и коммерческие приложения.

Агентно-ориентированные G-сети Петри, Web-система, интерфейс, программа, приложение.

Существуют различные инструменты исследования систем, одними из которых являются сети Петри. Теория сетей Петри делает возможным моделирование системы математическим представлением ее в виде сети. Анализ сетей Петри помогает получить важную информацию о структуре и динамическом поведении моделируемой системы и выработки пред-

ложений по ее усовершенствованию и изменению. G-сети – это объектно-ориентированное расширение сетей Петри [1]. Система G-сети составлена из некоторого количества G-сетей, каждая из которых представляет автономный модуль или объект, доступ к которым определен через хорошо определенный механизм.

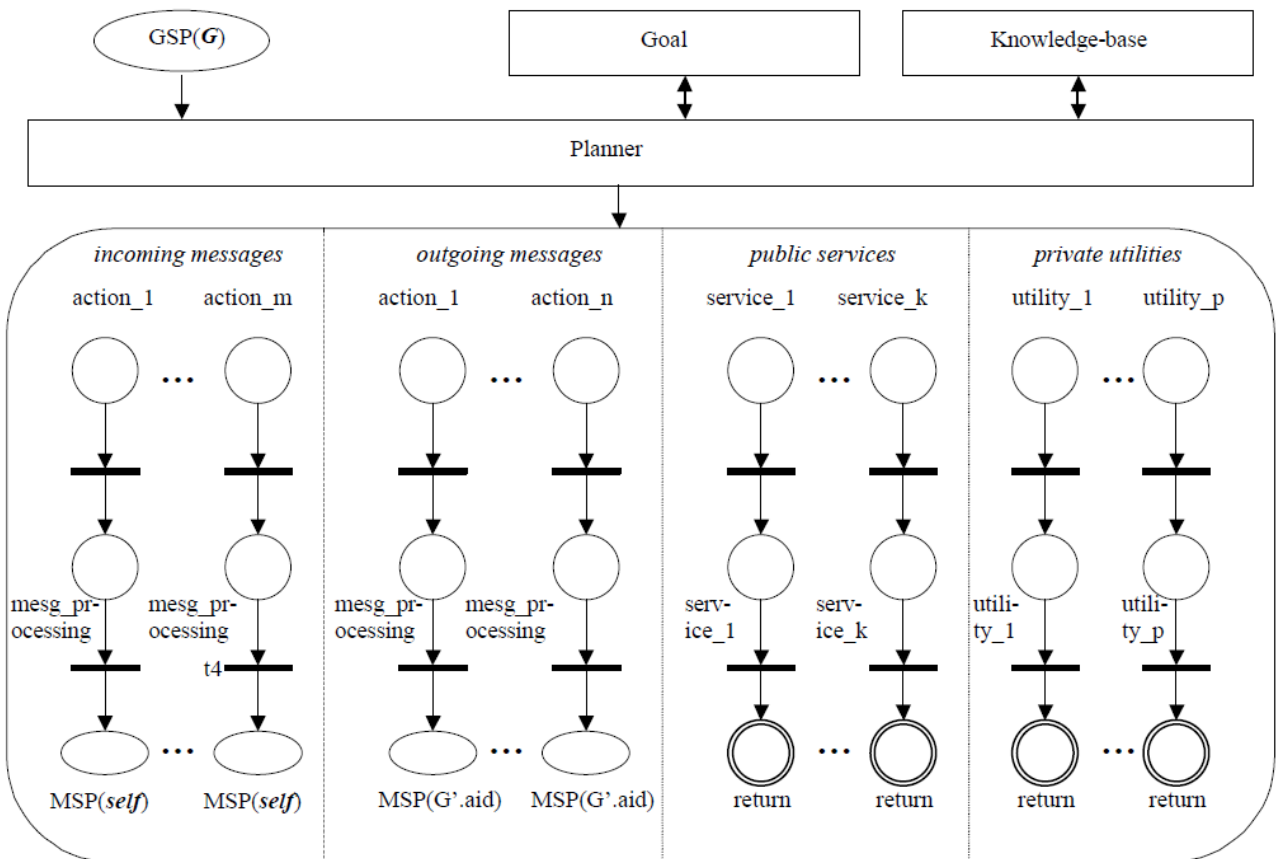


Рис. 1. Абстрактная схема агентно-ориентированной G-сети

Для моделирования агентно-ориентированной структуры необходимо применить некоторое расширение G-сетей, которое позволит описать класс агента [2]. При создании агента (в виде модели), во-первых, генерируется идентификатор агента и инициализируется ментальное состояние; во-вторых, вводятся три специальных модуля, чтобы сделать агента автономным и внутренне мотивированным:

- модуль *цели* описывает поставленные перед агентом цели;
- модуль *базы знаний* описывает окружающую среду и внутреннее состояние, которое агент данного класса может иметь;
- модуль *планирования* составляет план достижения целей из модуля цели.

Например, в модуле планирования агент может решать, игнорировать ли входящее сообщение, начать новую беседу или продолжать беседу, которая была начата другим агентом или им самими.

Внутренняя структура агентно-ориентированной G-сети состоит из 4-х секций (рис. 1): входящие сообщения, выходящие сообщения, публичные сервисы, приватные утилиты. В секциях входящих/выходящих сообщений определены *единицы обработки информации (MPU – Message Processing Units)*, которые используются для обработки сообщений от других агентов и могут использовать ISP в качестве вызовов методов, определенных в секции приватных утилит. Секция публичных сервисов дает агенту возможность работы в качестве сервера. Другие агенты могут использовать механизм вызова функций ISP для синхронного выполнения этих сервисов. Секция приватных утилит подобна секции публичных сервисов с отличием в том, что приватные утилиты могут быть вызваны только самим агентом.

Хотя и агенты, и объекты используют посылку сообщений для связи друг с другом, имеются некоторые отличия между ними. Отправка сообщений для объек-

тов – это формирование уникального вызова метода, в то время как агенты отличают различные типы сообщений, модели этих сообщений и используют сложные протоколы для переговоров. К тому же большинство агентов связываются посылкой асинхронных сообщений. Асинхронная передача является более фундаментальной, чем синхронная. Для поддержки посылки асинхронных сообщений вводится новый механизм под названием *место переключения отправки сообщений (MSP)*. Когда маркер достигает MSP (на рисунке он представлен эллипсом), маркер удаляется из места вызова и вносится в GSP-место вызванного агента. В отличие от ISP механизма, вызывающий агент не ждет, пока маркер вернется, прежде чем он продолжит выполнять следующий шаг. Также данное расширение G-сети позволяет использовать ключевое слово `self` для ссылки агента на самого себя.

Как и любое расширение, агентно-ориентированное расширение G-сетей поддается декомпозиции в обычные сети Петри. Таким образом, любую агентно-ориентированную систему можно представить в виде модели, тем самым на раннем этапе оценить плюсы и минусы, тупиковые ситуации, эффективность системы и т.д.

Используя агентно-ориентированное расширение G-сетей можно построить систему анализа бизнес-процессов на основе агентов, где каждый агент связан с отдельным бизнес-процессом. Таким образом, агенты, общаясь, могут правильно найти зависимости между друг другом и составить график зависимостей бизнес-процессов между собой. По составленной модели можно проанализировать эффективность системы, промоделировать ее работу и сделать вывод о том, стоит ли ее реализовывать. Также возможен анализ работы отдельных компонентов (отдельных агентов) системы, который укажет на изъяны и поможет исправить их.

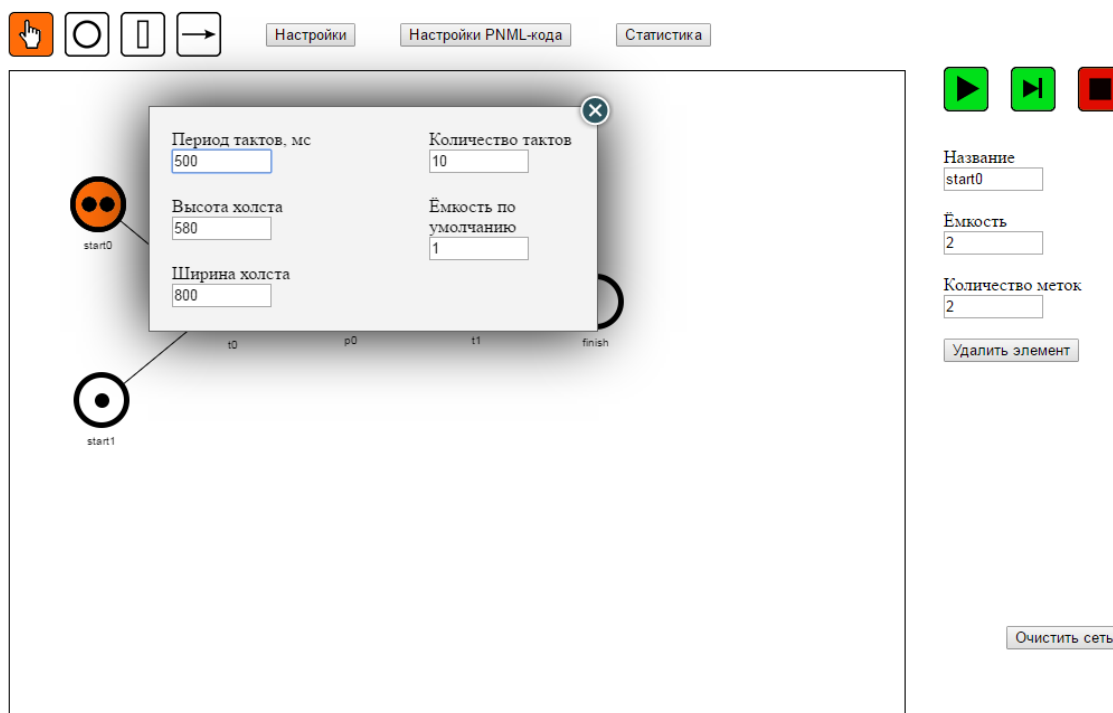


Рис. 2 Общий вид программы

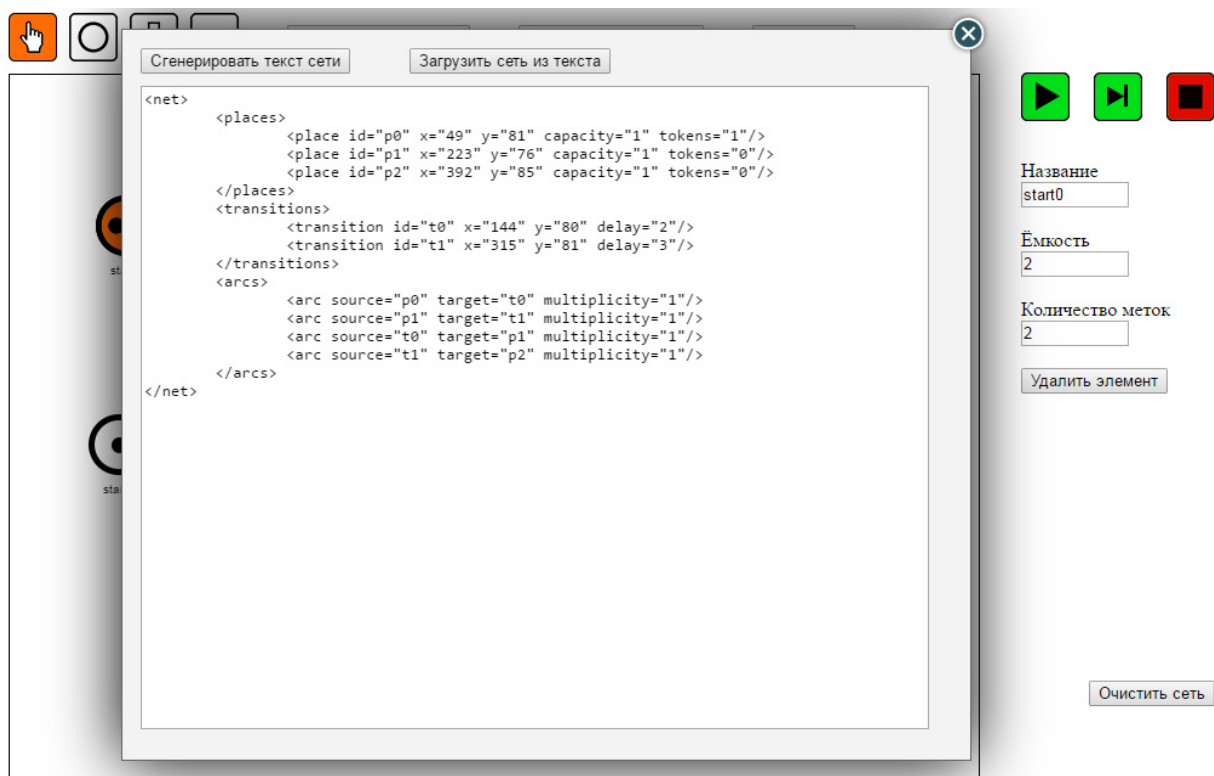


Рис. 3. Поле для ввода и вывода PNML-кода

В разрабатываемой Web-системе имеется возможность добавления элементов сети (позиций, переходов и дуг), их изменения, удаления и рисования. Программа позволяет корректно моделировать активирование перехода, а также выполнение такта сети. Кроме того, она может генерировать PNML-код (Petri Net Markup Language), соответствующий данной сети, выполнять построение сети по PNML-коду.

Для разработки Web-приложения используются HTML, CSS, Javascript и библиотека JQuery.

На рисунке 2 представлен общий вид программы. В качестве элемента рисования используется объект Canvas. Для ввода данных используются кнопки и поля ввода, имеется меню настроек, многострочное поле для ввода и вывода PNML-кода (рис. 3).

Применение сетей Петри и их расширений позволяет устранить нехватку формальной спецификации и инструментов проектирования агентно-ориентированных

и объектно-ориентированных систем. Разрабатываемая Web-система позволит проектировать крупномасштабные и коммерческие приложения, увеличив гарантии того, что разработанные системы будут надежными и пригодными для выполнения поставленной цели.

#### Литература

1. Perkusich, A. G-nets: A Petri Net Based Approach for Logical and Timing Analysis of Complex Software Systems / A. Perkusich and J. de Figueiredo // Journal of Systems and Software. – 1997. – 39 (1). – P. 39–59.
2. Haiping, Xu. An Agent-Based Petri Net Model with Application to Seller / Buyer Design in Electronic Commerce / Haiping Xu and Sol M. Shatz // In Proceedings of the IEEE 5th International Symposium on Autonomous Decentralized Systems (ISADS 2001) (March 26–28, 2001, Dallas, Texas, USA). – Dallas, 2001. – P. 11–18.

*A.N. Sorokin*

### DEVELOPMENT OF WEB-SYSTEM FOR BUILDING MODELS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES BUSINESS PROCESSES BASED ON THE DEVICE OF AGENT-ORIENTED G PETRI-NETS

The article discusses the construction of agent-based G-Petri models using a Web-based system. The appearance of the program interface and examples of setting its elements are presented. The proposed Web-system will allow to design large-scale and commercial applications.

Agent-based G-Petri nets, Web-system, interface, program, application.



Л.К. Стариков, А.Н. Сорокин  
Вологодский государственный университет

## РАСЧЁТ РАСХОДА ТОПЛИВА АВТОМОБИЛЯ ПО ИНФОРМАЦИИ СИСТЕМЫ САМОДИАГНОСТИРОВАНИЯ

В статье рассматриваются способы расчёта расхода топлива автомобиля по показаниям различных датчиков системы самодиагностирования. Представлены основные зависимости и результаты их реализации в виде программного приложения. Предложенные результаты позволяют провести анализ стиля вождения и дать советы по более экономичному управлению.

Расход топлива, автомобиль, OBD2, ELM327, измерение, расчет.

В последние годы в связи с повышением цен на топливо для автомобиля становится всё актуальнее вопрос экономичного расхода топлива. Он во многом зависит от стиля вождения автомобиля. Чтобы выработать экономичный стиль, нужно знать значение расхода топлива в каждый момент времени при движении автомобиля. В некоторых автомобилях расход топлива может выводиться на экране бортового компьютера. Для того чтобы использовать это значение в программных реализациях каких-либо алгоритмов, необходимо научиться считывать его с бортового компьютера.

Цель исследования состоит в том, чтобы выделить основные способы определения расхода топлива автомобиля и разработать программное обеспечение, которое производит его расчёт.

Несмотря на отсутствие информации о расходе на экране бортового компьютера, её можно получить, подключившись к бортовому компьютеру автомобиля через диагностический разъем OBD2. При этом потребуется специальный адаптер, например ELM327, и устройство (ПК, смартфон и т.д.), подключённое к нему по интерфейсу USB, Bluetooth или Wi-Fi. На конечном устройстве должно быть установлено специальное программное обеспечение (например, TorqueLite), позволяющее обмениваться информацией с адаптером. Подключение схематично изображено на рисунке 1.

Существует несколько способов получения данных о расходе топлива с бортового компьютера [1]:

1. Использование специальной AT-команды семейства протоколов OBD2: 015E [2] для получения значения расхода топлива в литрах/час. Эта команда посылается с конечного устройства на адаптер. В ответ на нее от адаптера придет несколько байт. Доста-

точно разобрать этот ответ в соответствии с выражением  $((A*256)+B)*0.05$  [3], где  $A$  – первый байт ответа в шестнадцатеричной системе счисления, а  $B$  – второй; в итоге получится значение мгновенного расхода топлива с размерностью литры/час.

2. На некоторых автомобилях можно считать данные с датчика импульса форсунки (Injector Pulse Width), такие как длительность открытия и производительность топливной форсунки. При этом расход можно получить расчётным путём по формуле:

$$R \left( \frac{\text{л}}{\text{ч}} \right) = \frac{\text{RPM}}{60} * \text{Cilinders} * \text{Injector} * 0,001 * \frac{\text{InjectorFlow}}{60*1000},$$

где  $R$  – искомый расход топлива с размерностью литры/час;  $\text{RPM}$  – обороты двигателя в минуту;  $\text{Cilinders}$  – количество цилиндров в двигателе;  $\text{Injector}$  – время, которое форсунка открыта за один оборот двигателя, в миллисекундах;  $\text{Injector Flow}$  – количество кубических сантиметров, проходящих через форсунку за минуту.

3. Если в автомобиле доступен датчик массового расхода воздуха ( $\text{MAF}$ ), то данные можно вычислить следующим образом:

$$R \left( \frac{\text{л}}{\text{ч}} \right) = \frac{\text{MAF}}{\text{AFR} * \text{Density}} * 3600,$$

где  $R$  – искомый расход топлива с размерностью литры/час;  $\text{MAF}$  – массовый расход воздуха (Mass Air Flow Rate) в г/сек;  $\text{AFR}$  – коэффициент топливо-воздушной смеси (Air-fuel ratio) – идеальное соотношение воздух/топливо: 14,7 г. воздуха на 1 г бензина;  $\text{Density}$  – плотность топлива в г/л.



Рис. 1. Подключение адаптера и конечного устройства к диагностическому разъему автомобиля

4. Также расход топлива можно получить, зная значение датчика абсолютного давления на впускном коллекторе – *MAP* (Manifold Absolute Pressure). Кроме этого необходимо знать температуру воздуха на впуске, объемную эффективность и количество оборотов двигателя для определения расчетного значения потока воздуха:

$$MAF = \frac{RPM * MAP}{IAT * 120} * \frac{VE}{100} * ED * \frac{MM}{R};$$

$$FC \left( \frac{\text{л}}{\text{ч}} \right) = \frac{MAF}{AFR * Density} * 3600,$$

где *FC* (fuel consumption) – искомый расход топлива с размерностью л/ч; *MAF* – массовый расход воздуха (Mass air flow rate) в г/сек; *RPM* – обороты двигателя в минуту; *MAP* – массовый расход воздуха в кПа; *IAT* – температура воздуха на впуске в °К; *R* – универсальная газовая постоянная  $R0 \approx 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{Моль} * \text{К}}$ ; *MM* – средняя молекулярная масса воздуха – 28,97 г/моль; *ED* – рабочий объем двигателя в литрах; *VE* (Volumetric Efficiency) – объемная эффективность двигателя в процентах, корректировочная константа. Для атмосферного двигателя значение по умолчанию «95».

Расчет расхода топлива будем производить на примере автомобиля Kia Rio 2013 года выпуска с бензиновым двигателем объемом 1,6 литра. По наличию доступных датчиков осуществим только способ № 4. Значения *RPM*, *MAP* и *IAT* можно получить из бортового компьютера, используя команды 010С, 010В и 010F соответственно. Эти команды посылаются с конечного устройства на адаптер. В ответ на них от адаптера придут последовательности байтов. Достаточно разобрать ответы в соответствии с нужным выражением. Для скорости вращения коленчатого вала двигателя это

$$((A * 256) + B) / 4,$$

где *A* – первый байт ответа в шестнадцатеричной системе счисления, а *B* – второй.

В результате расчета значение мгновенного расхода топлива получается с размерностью литры/час. Чтобы получить значение расхода в л/100 км нужно л/час поделить на текущее значение скорости автомобиля (км/час) и умножить на 100.

Результат программной реализации расчета расхода топлива по способу № 4 представлен на рисун-

ке 2. Из него следует, что мгновенный расход топлива составляет 3,7 л/час или 8,8 л/100 км. В это же время на бортовом компьютере шкала расхода показывала 7,5–9,5 л/100 км. Такой разброс обусловлен малой информативностью отображаемой на экране шкалы. Показания программы довольно близки к показаниям бортового компьютера. Это означает, что их можно использовать в дальнейших исследованиях.

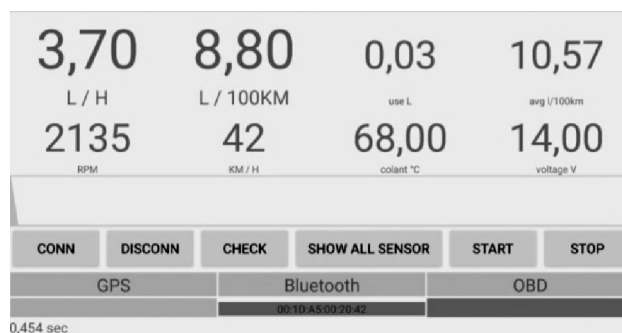


Рис. 2. Скриншот программы с результатами работы

В ходе исследования были выделены 4 способа определения расхода топлива и разработано программное обеспечение на платформе Android, позволяющее определить мгновенный расход топлива с размерностью л/час и л/100 км по способу под номером 4. Это первый этап на пути создания программного обеспечения для анализа стиля вождения, которое будет помогать водителю выбирать более экономичный стиль управления автомобилем.

## Литература

1. Патент US9939301B2. Автоматизированная система контроля расхода топлива : дата приоритета 2016.02.16 / Джеймс Дэвид Ситон, Александр Шубс.
2. ELMElectronics. – Text : Electronic // OBD. – URL: <https://www.elmelectronics.com/products/ics/obd/#ELM327v21> (дата обращения: 28.11.2019).
3. ELMScanner. – Текст : электронный // Считываемые параметры (PID'ы). – URL: <http://elm-scanner.ru/obd-2/obd-pids.html> (дата обращения: 28.11.2019).

*L.K. Starikov, A.N. Sorokin*

## CALCULATION OF CAR FUEL CONSUMPTION BY INFORMATION OF THE SELF-DIAGNOSTIC SYSTEM

The article discusses how to calculate the fuel consumption of a car according to the testimony of various sensors of the self-diagnosis system. The main dependencies and the results of their implementation in the form of a software application are presented. The proposed results allow an analysis of the driving style and give tips on more economical management.

Fuel consumption, car, OBD2, ELM327, measurement, calculation.



## ИНТЕГРАЦИЯ АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ С ГЕОИНФОРМАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ

*Работа поддержана грантами РФФИ № 17-06-00514 А, № 19-01-00103 А и № 18-47-350001 р-а*

В данной работе рассматриваются вопросы интеграции на информационном уровне агентно-ориентированных моделей сложных предметных областей с геоинформационными системами с использованием онтологий.

Агентно-ориентированное моделирование, геоинформационные системы, онтологии.

В последнее время значительный практический интерес вызывают агент-ориентированные модели сложных предметных областей. Они позволяют более точно отображать реальные процессы по сравнению с иными используемыми в настоящее время способами имитационного моделирования. Однако с расширением пространства моделирования количество объектов среды становится огромным, а для формирования поведения агентов необходимо учитывать их текущее точное по отношению к объектам среды расположение.

Решить эту проблему можно путем интеграции агентно-ориентированных моделей с геоинформационными системами, которые имеют развитые средства хранения и отображения в пространстве различных объектов с точной привязкой их к географическим координатам, аналитической обработки пространственной информации и интерфейсы взаимодействия с внешними системами. Подходам к ее реализации на сегодняшний день посвящено множество научных работ. Среди них труды таких зарубежных авторов, как D.T. Robinson, A.T. Crooks, A. Heppendall, H. Randy Gimblett. В нашей стране наиболее весомые результаты достигнуты учеными, представляющими Центральный экономико-математический институт РАН. Среди них можно выделить В.Л. Макарова, А.Р. Бахтизина, Е.Д. Сушко. Анализ представленных научных работ показывает, что основное внимание авторы уделяют аспектам технологической интеграции на уровне программных продуктов, а также решению проблемы большой размерности пространства вычислений. При этом многими исследователями отмечается, что реальные пространственные данные должны не только рассматриваться внутри модели, но и стать элементами самой модели [1]. В этой связи актуальной является задача интеграции АОМ и ГИС на информационном уровне.

Данная задача разбивается на две подзадачи: соотнесение информационных объектов, определенных на уровне обеих систем, и построение на этой базе общей вычислительной модели.

Соотнесение информационных объектов двух систем необходимо рассматривать через призму их информационных моделей. В работе [2] отмечается, что отображение информационных моделей является необходимым шагом при решении задач над неоднородными информационными ресурсами.

При отображении моделей решается интеллектуальная задача формирования концептуальных конструкций неоднородных моделей различных информационных систем и установления соответствия их элементов путем поиска релевантных (имеющих сходную семантику) конструкций. Интеграция информационно неоднородных систем должна осуществляться при наличии единого концептуального интерфейса между ними [3].

В настоящее время активно используются и динамично развивающимся средствами структурирования, формализации и унификации представления знаний с целью их многократного и гибкого использования в информационных системах являются онтологии [4]. Они используются для формальной спецификации понятий и отношений, которые характеризуют определенную область знаний. Преимуществом онтологий в качестве способа представления знаний является их формальная структура, которая упрощает их компьютерную обработку [5]. Онтология обеспечивает непротиворечивое накопление любого количества информации в стандартной структуре классификации. Такой подход гарантирует однозначную идентификацию информационных элементов независимо от различных трактовок их наименований.

Традиционно онтология представляется в виде следующей формальной системы:

$$O = \langle X, R, F \rangle,$$

где  $X$  – конечное множество концептов (понятий) заданной предметной области;

$R$  – конечное множество семантически значимых отношений между концептами предметной области;

$F$  – конечное множество функций интерпретации, заданных на концептах и/или отношениях.

Создание единого интерфейса интеграции информационно-неоднородных систем требует разработки целевой онтологии, общей для подсистем, способной на концептуальном уровне интегрировать разномодальные входы и выходы. Для обеспечения данного процесса целевая онтология должна иметь возможность интерпретировать концепты уровня интегрированных систем, что предполагает существование их прикладных онтологий. В нашем случае имеются две прикладные онтологии: онтология геоинформационной системы и онтология агент-ориентированной модели.

Онтология геоинформационной системы может быть выражена через концептуальную модель предметной области, лежащей в основе ее базы данных. На ее уровне определены основные концепты, их атрибуты и связи. При этом концептуальную модель следует рассматривать с учетом наличия двух типов взаимоуязванных сущностей, отображающих атрибутивный состав пространственных объектов и их расположение. Формально онтология геоинформационной системы представляется в следующем виде:

$$O^{GIS} = \langle (X_0^{GIS}, X_S^{GIS}), (R_0^{GIS}, R_{0-S}^{GIS}) \rangle,$$

где  $X_0^{GIS}$  – конечное множество концептов, отображающих пространственные объекты геоинформационной системы;

$X_S^{GIS}$  – конечное множество концептов, отображающих элементы пространственного расположения объектов геоинформационной системы;

$R_0^{GIS}$  – конечное множество семантически значимых отношений между концептами, отображающими пространственные объекты геоинформационной системы;

$R_{0-S}^{GIS}$  – конечное множество семантически значимых отношений между концептами, отображающими пространственные объекты геоинформационной системы, и концептами, отображающими элементы пространственного расположения объектов геоинформационной системы.

В силу явного определения в концептуальных моделях геоинформационных моделей концептов и отношений между ними, функции интерпретации в онтологии геоинформационной системы отсутствуют:

$$F^{GIS} = \emptyset.$$

Онтологию агент-ориентированной модели можно определить следующим образом:

$$O^{AOM} = \langle X^{AOM}, R^{AOM}, F^{AOM} \rangle,$$

где  $X^{AOM}$  – конечное множество концептов агент-ориентированной модели, отображающих агентов и элементов среды;

$R^{AOM}$  – конечное множество семантически значимых отношений между концептами агент-ориентированной модели;

$F^{AOM}$  – конечное множество функций интерпретации, заданных на концептах и отношениях между концептами агент-ориентированной модели. В них определены модели поведения концептов.

При интеграции происходит преобразование информации от одной предметной онтологии к другой

через целевую онтологию. Отдельные сегменты предметных онтологий описывают одну предметную область и содержат концепты и связи, имеющие сходную семантику. В процессе интеграции на уровне целевой онтологии элементы одной предметной онтологии ассоциируются с элементами другой предметной онтологии. Исходя из этого, целевая онтология представляется как:

$$O^{PRP} = \langle X^{PRP}, R^{PRP}, F^{PRP} \rangle,$$

где  $X^{PRP}$  – множество концептов из предметных онтологий, имеющих пересечение в их семантическом значении:

$$X^{PRP} = ((X^{AOM} \equiv X_0^{GIS}) \cup (X_0^{GIS} \equiv X^{AOM}) \cup X_S^{GIS} \leftrightarrow (X_0^{GIS} \equiv X^{AOM})),$$

где  $\equiv$  – функция определения семантического соответствия элементов одного множества элементам другого множества,  $\leftrightarrow$  – функция выбора элементов одного множества, имеющих связи с элементами другого множества;

$R^{PRP}$  – множество отношений между концептами, входящими во множество  $X^{PRP}$ :

$$R^{PRP} = ((R^{AOM} \leftrightarrow (X^{AOM} \equiv X_0^{GIS})) \cup (R_0^{GIS} \leftrightarrow (X_0^{GIS} \equiv X^{AOM})) \cup (R_{0-S}^{GIS} \leftrightarrow (X_S^{GIS} \leftrightarrow (X_0^{GIS} \equiv X^{AOM}))));$$

$F^{PRP}$  – конечное множество функций интерпретации, заданных на концептах и отношениях целевой онтологии. Содержит функции интерпретации элементов одной предметной онтологии посредством элементов другой предметной онтологии.

В функциях интерпретации целевой онтологии необходимо реализовать механизмы устранения конфликтов предметных онтологий, к которым относят [6]:

- конфликт имен;
- конфликт типов или форматов атрибутов;
- использование различного набора атомарных атрибутов для описания объектов одного класса;
- использование различных объектных структур и степени детализации для описания информации об объектах одного класса;
- использование разных по семантике элементов онтологии для типизации одних и тех же по семантике объектов (семантические конфликты);
- конфликты ограничений целостности онтологий.

Кроме этого, необходимо установить соответствие между механизмами описания пространственного расположения объектов в геоинформационной системе и агент-ориентированной системе.

Использование предлагаемого подхода позволит разрабатывать программные интерфейсы для интеграции агент-ориентированных моделей и геоинформационных систем, которые могут обеспечить решение задач по идентификации объектов одной системы в другой с целью получения возможности интерпретировать результаты выполняемых ими специализированных функций, а также синтеза наборов экземпляров элементов одной системы на основе информации, содержащейся в другой системе.

## Литература

1. Гулин, К. А. Российский и зарубежный опыт интеграции агент-ориентированных моделей и геоинформационных систем / К. А. Гулин, А. И. Россошанский // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. – 2016. – № 5. – С. 141–157.
2. Скворцов, Н. А. Использование онтологии верхнего уровня для отображения информационных моделей / Н. А. Скворцов, С. А. Ступников // Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции : труды 10-й Всероссийской научной конференции (RCDL'2008). – Дубна : ОИЯИ, 2008. – С. 122–127.
3. Хахалин, Г. К. Прикладная онтология на языке гиперграфов / Г. К. Хахалин // Труды второй Всероссийской конференции с международным участием «Знания-Онтологии-Теории» (ЗОНТ-09). – Новосибирск, 2009. – С. 223–231.
4. Горохов, А. В. Синтез имитационных моделей макросистем на основе онтологических описаний / А. В. Горохов, О. В. Шелех // Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2009. – Т. 39. – С. 195–201.
5. Митрофанова, О. А. Онтологии как системы хранения знаний / О. А. Митрофанова, Н. С. Константинова // Всероссийский конкурсный отбор обзорно-аналитических статей по приоритетному направлению «Информационно-телекоммуникационные системы», 2008. – 54 с.
6. Erhard Rahm. A survey of approaches to automatic schema matching / Erhard Rahm, Philip A. Bernstein. – (DOI) 10.1007/s007780100057 // The VLDB Journal. – 2001. – Vol. 10, № 4. – P. 334–350.

*A.N. Shvetsov, S.V. Dianov*

### INTEGRATION OF AGENT-ORIENTED MODELS WITH GEOINFORMATION SYSTEMS

This paper discusses the issues of integration at the information level of agent-based models of complex subject areas with geographic information systems using ontologies.

Agent-based modelling, geographic information systems, ontology.

УДК 537.523.3



*А.Д. Булат<sup>1</sup>, В.М. Филенков<sup>2</sup>,  
В.А. Обрубов<sup>2</sup>, Н.Л. Бобков<sup>1</sup>,  
О.В. Литовченко<sup>1</sup>*

*<sup>1</sup>ООО НПК «АкваПротех»*

*<sup>2</sup> Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Тольяттинский филиал*

## ЭФФЕКТЫ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА В ТЕХНОЛОГИИ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ

Статья посвящена природоподобным технологиям обеззараживания. Рассмотрен активный этап грозы с позиций воздействующих обеззараживающих факторов. На базе анализа значимых факторов воздействия, влияющих на эффективность обеззараживания, делается вывод о характеристиках конструкции. Блок устройства обеззараживания воды безреагентным способом выполнен как двухкамерный реактор коронного разряда на поверхность воды переливной шандоры восходящих и нисходящих потоков, где активация ФХП, насыщение озоном, воздействие электромагнитного  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучения приводят к росту эффективности процесса обеззараживания воды.

Гроза, природные технологии, обеззараживание, факторы воздействия, коронный разряд, электромагнитные  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучения, конструкция.

Существующие способы поддержания высокого качества окружающей среды многообразны и многогранны, но не всегда эффективны и не могут конкурировать с природными технологиями самоочищения экосистем. Явление самоочищения биосферы как естественное обезвреживание загрязнителей окружающей среды повышает уровень эволюционного развития цивилизации. Использование же природоподобных технологий по очистке водно-воздушного бассейна является необходимым и достаточным условием снятия антагонизма между биосферой и техносферой.

Грозовая деятельность как действующая технология очистки и обеззараживания воздушно-водного бассейна земли (*после грозы воздух чист, насыщен ионами, земля пропитана водой с Ph, близкой к нейтральной*) подсказывает техническую реализацию процесса очистки водо-воздушных смесей.

Исследования показывают, что бактерии попадают в облака посредством их всасывания тучей, тем самым обеспечивается их транспорт, обеззараживание до определенного уровня и посев по территориям.

Технологическое решение с соответствующим уровнем эффективности, при котором обеспечивается как необходимая степень инактивации бактерий, так и показатели качества воды (рН, цветность, вкус и запах), находится в самом механизме воздействия факторов грозообразования на воздушно-водную среду [1].

Реализация эффектов обеззараживания и очистки посредством этих факторов может быть представлена устройством блочного типа, состав и принцип действия которого основан на аналогии периодам формирования и прохождения грозовой деятельности в атмосфере (рис. 1).

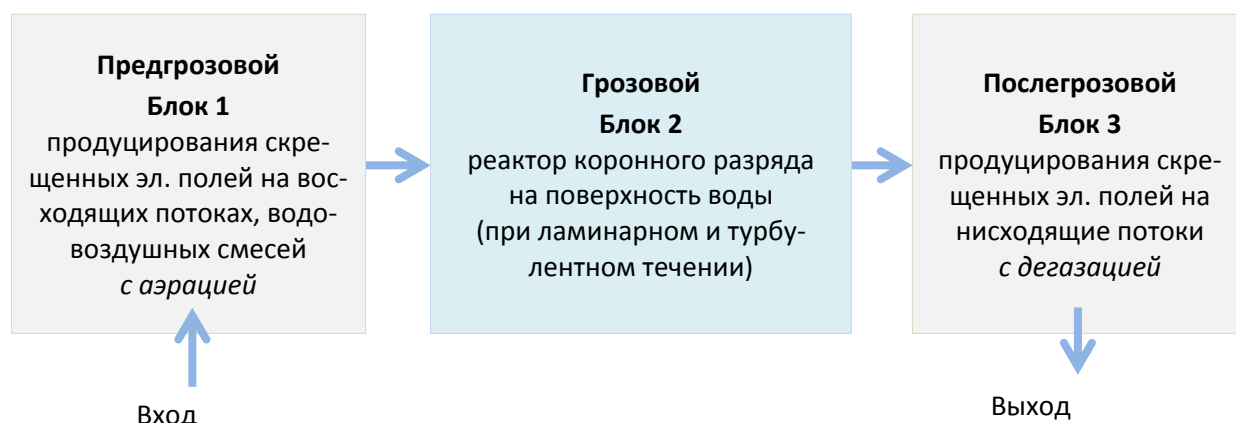


Рис. 1. Ассоциативная схема технологии обеззараживания на эффектах атмосферного электричества

*Предгрозовой период* характеризуется факторами воздействия грозовой деятельности на биосферу Земли. Формирование облаков как период воздействия определяется естественной конвекцией, рельефом местности, возникновением тёплых и холодных атмосферных фронтов, циклонами.

Возникающие при этом эффекты характеризуются: адиабатным расширением, орографическим подъемом масс, восходящим скольжением масс, закручиванием воздушных масс к центру депрессии.

Для блоков № 1 и № 3, разработанных в соответствии с аналогично действующими факторами предгрозового и послегрозового периода, *характерно воспроизводство*: эффекта закрученного водовоздушного потока, воздействия электрического поля и кавитации как факторов обеззараживания.

Обеззараживание может быть представлено как результат синергетического силового действия электрического поля, кавитации и эффекта закрученного водовоздушного потока. Происходят процессы межфазного, структурного и энергетического взаимодействия на уровне молекулярных, атомных и ионных связей, открываются новые возможности для реализации прорывных технологий с получением показателей, которых невозможно достичь с помощью существующих технологий и оборудования. Механизм воздействия показан в ряде публикаций авторов [1-2].

Сочетание обработки воды с применением электро-полевой, вихревой и кавитационных технологий позволяет устранить основные недостатки известных устройств по обеззараживанию (низкая эффективность, высокая энергоёмкость, химреагенты, эксплуатационные расходы). Однако после этого воздействия Ph требует корректировки, ряд химических реакций не инициирован, нарушение биосинтеза ДНК не всегда достигается, только при двойном разрыве спирали ДНК наступит повреждение генетического аппарата клетки.

Развитие грозового периода по метеорологической оценке характеризуется следующим состоянием: дождевое облако развилось до максимального и достигло «запирающего» слоя – тропопаузы, – вследствие чего вертикальное развитие с вершины начинает развиваться в горизонтальном направлении. Зарождается «наковальня» – перистые облака из ледяных кристалликов. В облаке конвективные потоки создают восходящие потоки снизу к вершине облака, а осадки организуют нисходящие потоки от вершины облака к основанию. Конвекция приводит к развитию гроз. Существуют грозы с инверсной структурой зарядов (отрицательным зарядом в верхней части облака и положительным зарядом во внутренней части облака), а также со сложной структурой (множество зон объёмных зарядов разной полярности). Напряженность электрического поля между объёмными зарядами порождает силовое действие на структуры и массу электрических разрядов с ионизирующим электромагнитным излучением.

Данная характеристика позволяет выполнить модуляцию устройства обеззараживания, используя методы аналогий физических процессов периода. Известен метод очистки воды коронным разрядом на ее поверхности, он рассматривается как один из электроразрядных методов обработки воды с малым химическим потреблением озона.

Такой подход является простым и надежным методом, характеризующимся малыми удельными энергозатратами, и может быть применен *при модулировании устройства* по аналогии физических признаков формирования основного грозового периода [3].

Активный грозовой период как природный фактор воздействия на биосферу характеризуется тем, что под действием ионизирующих излучений « $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ » идет разложение химических соединений, образуются свободные радикалы и отдельные нейтральные молекулы, наблюдается радиолиз.

Радиолиз смещает равновесие химических реакций, инициирует и усиливает их прохождение, при других невозможных условиях, расширяет критерии реализации химических реакций посредством разнонаправленных потоков как турбулентного, так и ламинарного течения жидкости. В результате организации такого действия течения и воздействия продуктов радиолиза воды идет и радиолиз молекул органических веществ клетки (ДНК, нуклеотидов, аминокислот, белков, углеводов, фосфолипидов и др.) с образованием органических радикалов, обладающих повреждающим механизмом биосубстрата. Взаимодействие свободного кислорода с органическими радикалами лежит в основе эффекта роста радиационного повреждения белков, ДНК и других биомолекул («кислородный эффект») [4].

Аналогия моделирования устройства по характеристикам развития грозового облака может быть реализована в проточной системе типа шандоры трубной конструкции с реактором коронного разряда (рис. 2).

Конструкция устройства представляет собой вертикальную трубу со столбом воды, подача в котором ограничена напором насоса. За счет перелива уровня трубы восходящего потока, вода, расширяясь, падает на «наковальню» – зеркало уровня воды направляющей трубы ниспадающего потока с переливом под напор, в трубу направления нового восходящего потока, достигая перелива, меняет направление, идет повторение, но с разными параметрами потоков исходя из геометрии устройства.

Устройство шандоры как гидротехнического затвора, служащего для частичного перекрытия потоков жидкостей в технологических процессах с реактором коронного разряда, диктуется параметрами факторов воздействия. Основополагающими факторами конструкции, определяющими ее характер и отдельные черты, будут, прежде всего, характеристики воздействия ионизирующего излучения на воду.

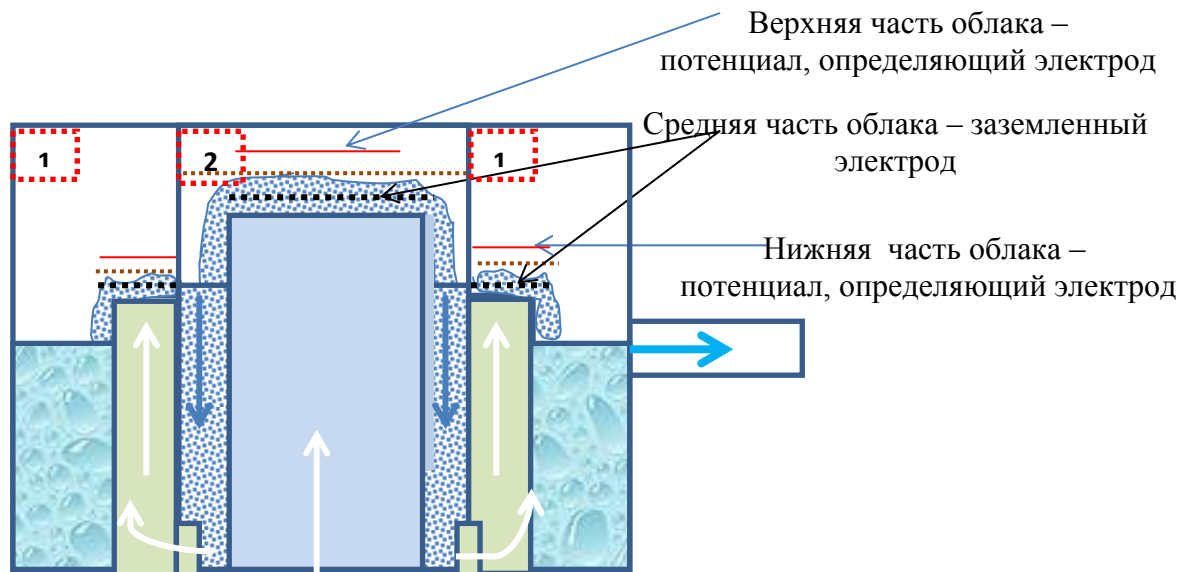


Рис. 2. Структурно-технологическая схема шандоры с реакторами коронного разряда – ассоциатив грозы:  
 1 – камера реактора коронного разряда над турбулентным потоком;  
 2 – камера реактора коронного разряда над ламинарным потоком

Значимыми факторами воздействия, влияющими на эффективность обеззараживания, являются:

- длительность воздействия, вид и параметры ИИ, уровень концентрации перекиси водорода ( $H_2O_2$ ) в воде;

- время существования электрического поля в проводящей среде ( $10^{-6}$  с), т.е. за это время воздействие прошло, можно сбрасывать обрабатываемую воду и поставлять новый объем для обработки, (таким образом, диктуется решение на использование проточного способа обработки воды ионизирующим излучением);

- уравнивание образования и разложения перекиси водорода не дает дальнейшего роста ее концентрации.

Примеси уменьшают скорость обратной реакции, и равновесие не наступает, рост концентрации перекиси водорода нарастает. После достижения стационарного состояния концентрации продукты радиолитического перестают зависеть от времени (дозы) и остаются на постоянном уровне сколько бы времени не продолжалось облучение. Все процессы протекают в граничных периферийных слоях воды, поэтому сброс обработанной воды в следующую емкость, позволяет интегрировать там сброшенные объемы воды с повышенным содержанием перекиси водорода ( $H_2O_2$ ).

Следовательно, решение использования проточного способа с целью обеспечения повышенного содержания ( $H_2O_2$ ) в объеме воды ламинарного потока подтверждается уровнем проникающей способности ионизирующего излучения:

$\alpha$ -излучения – в воздухе 8–9 мм, в воде и в живой ткани 20–60 мкм – свидетельствует о его безопасности и возможности обработки периферийного слоя воды при высокой плотности ионизации – удобно и эффективно вести обработку на проточной воде;

$\beta$ -частицы – пробег в воде и в живой ткани 12,5 мм – свидетельствует о его безопасности и возможности обработки слоя воды толщиной 1,2 см при плотности ионизации  $\alpha/1000$ , в виду такой проникаемости излучения и его малой интенсивности проточный способ обработки будет адекватным – согласующимся с  $\alpha$ -излучением высокой плотности;

$\gamma$ -излучение – обладает высокой проникающей способностью (36см) с интенсивностью  $\alpha/60000$  – незначительная интенсивность и высокая проникающая способность излучения за счет конструктивного исполнения «шандоры», обрабатываемый слой воды 70 см и диаметр последующих емкостей 80 см дает основание говорить о защите и возможности обработки воды интегрированным способом в функции подачи.

Таким образом, исходя из воздействия коронного разряда на поверхность воды, определяются аспекты устройства с позиций геометрии и длительности обработки. Анализ характеристик воздействия ионизирующего излучения коронного разряда дает возможности приближения модели с аналогом процесса обеззараживания в природе.

Изучение литературных источников свидетельствует о том, что очистка воды коронным разрядом

на ее поверхность по ряду показателей является приоритетным методом. А такие показатели, как удельные энергозатраты, эффективность обеззараживания, надежность и экономичность, легкоуправляемость процесса дают приоритет перед другими электроразрядными методами [3].

Для практической реализации такого метода используем результаты анализа воздействующих факторов ионизирующего излучения коронного разряда на воду, что дает четкое представление действия разряда, а специальная конструкция устройства позволяет вводить в раствор дополнительные активные частицы газовой фазы, например озон.

Реакторы коронного разряда часто используются для воздействия на водные растворы органических соединений, имеют целый ряд вариантов конструкций электродных систем [5].

Хотя этот тип разряда сложен для технической реализации, он чаще всего применяется для обработки водных растворов органических соединений. Разработана масса конструкций с многочисленными вариантами использования реакторов. Нами предлагается схемное технологическое решение применения двухкамерного реактора. Это дает возможность вести обработку поверхности воды как при турбулентном потоке, так и при ламинарном, что в итоге скажется на глубине и эффективности обеззараживания. Уже испытаны пилотные разработки, позволяющие вести обработку в проточных системах производительностью 10–15 м<sup>3</sup>/час.

Не вдаваясь в аспекты конструкции электродной системы и электрической схемы автоматического управления в режиме резонанса, надо отметить надежность и гибкость работы схемы в функции электропроводности водного раствора, о чем публиковалось ранее [6].

Следовательно, нами получены необходимые и достаточные условия и характеристики аналогового устройства, способного воспроизводить воздействующие факторы обеззараживания воды, аналогичные основному периоду грозообразования. Опытные конструкторские разработки свидетельствуют об их перспективности, экологичности и эффективности.

В процессе разработки новых направлений экологизации процессов производства, исходя из опыта и наблюдений природных технологий, можно констатировать, что имеются возможности разрабатывать и внедрять технологии, которые не наносят урон окружающему миру, а существуют с ним в гармонии и позволяют восстановить нарушенный человеком баланс между биосферой и техносферой.

На первый взгляд относительная простота технического решения реализации технологии обеззараживания с использованием явлений атмосферного электричества всё же иногда ставит жесткие во-

просы, реальная физика и энергетика процессов при реализации этого эффекта, ввиду не познанных явлений, позволяет опираться на экспериментальные знания.

В реальных условиях достижение абсолютного обеззараживания требует от исследователя системного подхода с аспектами синергетического взаимодействия (активация ФХП плюс насыщение озном, воздействие электромагнитного  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -излучения, акустическое действие ударной волны) приводит к росту эффективности процесса обеззараживания, что зачастую требует системных знаний нескольких специальностей ввиду выявленных эффектов, порожденных на стыке различных научных знаний.

Однако, кроме того, требуется комплекс мероприятий как на стадии опытного промышленного образца, так и в период отработки режимов уровня обеззараживания в условиях эксплуатации в тесной увязке с мероприятиями трансфера разработанной технологии.

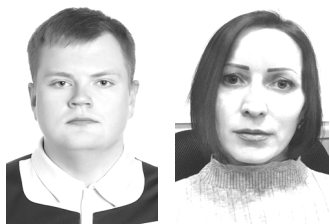
### Литература

1. Булат, А. Д. Аспекты инноваций внедрения природоподобного обеззараживания / А. Д. Булат, В. М. Филенков, В. А. Обрубов // Рецензируемый научный журнал «Тенденции развития науки и образования». – Февраль 2019 г. – № 47, Часть 6, Изд. НИЦ «ЛЖурнал», 2019. – Кемерово, С. 46–49.
2. Синергетика лизиса и инактивации бактерий в биосфере / А. Д. Булат, В. А. Обрубов, В. М. Филенков, И. А. Лушкин // Синергетика природных, технических и социально-экономических систем : сборник статей XVI Международной научной конференции (Тольятти, 23–24 мая 2019 г.). – Тольятти : ПВГУС, 2019. – С. 267–274.
3. Божко, И. В. Коронный разряд на поверхность электропроводящей жидкости и его использование для обработки воды / И. В. Божко, Н. И. Фальковский // Институт электродинамики НАН Украины. – Киев : Техн. електродинаміка. – 2007. – № 2.
4. Внутренние болезни. Военно-полевая терапия : учебное пособие / под редакцией профессора А. Л. Ракова и профессора А. Е. Сосюкина. – Санкт-Петербург : ФОЛИАНТ, 2003. – 384 с.
5. Горячев, В. Л. Электроразрядный метод очистки воды. Состояние, проблемы и перспективы / В. Л. Горячев, Ф. Г. Рутберг, В. Н. Федюкович // Известия РАН. Энергетика. – 1998. – № 1. – С. 40–55.
6. Булат, А. Д. Природа атмосферного электричества – основа обеззараживания природоподобных технологий / А. Д. Булат, В. М. Филенков, В. А. Обрубов // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2019. – № 3 (5), С. 19–22.

**EFFECTS OF ATMOSPHERIC ELECTRICITY  
IN DECONTAMINATION TECHNOLOGY**

The article is devoted to nature-friendly disinfection technologies. The active stage of a thunderstorm is considered from the standpoint of the acting disinfecting factors. Basing on the analysis of significant exposure factors influencing the effectiveness of disinfection, the conclusion on the design characteristics is drawn. The unit of a water disinfection device is designed as a two-chamber corona discharge reactor on the water surface of the overflow Sandora of ascending and descending flows, where the activation of FCP, saturation with ozon, and exposure to electromagnetic  $\alpha$ ,  $\beta$ , and  $\gamma$  radiation lead to an increase in the efficiency of the water disinfection process.

Thunderstorm, natural technologies, decontamination, impact factors, corona discharge, electromagnetic ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) radiation, design.



### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛЬНЯНОЙ КОСТРЫ КАК СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЛИТНОГО УТЕПЛИТЕЛЯ**

Данная статья является попыткой сформулировать основные тезисы о целесообразности применения в строительстве отходов переработки льна. В статье рассмотрен вариант применения отходов производства льняной тресты в качестве плитного утеплителя. В качестве доводов о возможном использовании костры как сырья для производства утеплителя приводятся результаты теплофизических и физико-механических испытаний.

Вологодская область, костра, отходы льнопроизводства, применение растительных отходов, строительные материалы.

Вологодская область традиционно является крупным производителем льна. Его выращивание обусловлено в первую очередь благоприятным климатом. Также имеется существующий общеизвестный бренд – «Вологодское кружево», что обуславливает развитие льнопроизводства на территории области.

В современных реалиях отрасли строительных материалов и изделий возникает запрос со стороны потребителей на материалы, изготовленные без применения синтетического и искусственного сырья. Применение материалов, созданных на основе отходов льнопроизводства, позволит расширить предложение строительных материалов, созданных на сырье природного происхождения.

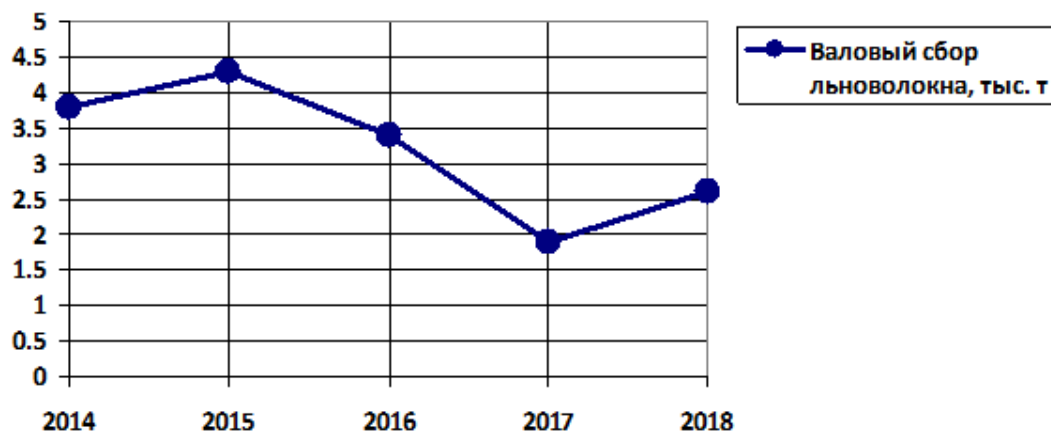
Однако о целесообразности использования отходов производства льняной тресты в строительных материалах можно говорить только после адекватного анализа. Поэтому в настоящей статье приводится обоснование целесообразности применения в строительстве переработки льна как сырья для производст-

ва материалов с повышенными теплофизическими свойствами.

Для оценки объемов заготавливаемого льна применим статистические данные по валовому производству льноволокна (рис. 1) [3]. Согласно статистическим данным за 2014 г. валовый сбор льноволокна составил 3,8 тыс. т; за 2015 – 4,3 тыс. т; за 2016 – 3,4 тыс. т; за 2017 – 1,9 тыс. т; за 2018 – 2,6 тыс. т.

За 2017 год валовый сбор является одним из самых низких за период с 2000 года. Это объясняется следующими причинами: неурожайный год, устойчивое снижение спроса на льняную продукцию, профицит льняных изделий на рынке.

Согласно данным исследований [4] выход собственно волокна у льна-долгунца (наиболее распространенного на территории области) составляет от 33 до 37 процентов от общего объема тресты. Следовательно, отходы (костра), при достаточно грубой оценке, которые могут быть использованы в строительстве в зависимости от предъявляемого качества к ним, имеют объем, равнозначный валовому сбору льноволокна.



*Рис. 1. Валовый сбор льноволокна в Вологодской области*

В Вологодской области осуществляется активная поддержка льнопроизводителей [2]. Выделяются субсидии, в т.ч. из регионального бюджета. Губернатором поставлена задача по разработке программы, согласно которой возмещается до 50% затрат, направленных на приобретение тракторов, и 80 % затрат на машины и оборудование для выращивания и переработки льна. Всё это позволяет предполагать, что производство льноволокна будет увеличиваться.

В строительной области имеется позитивный опыт применения отходов льнопроизводства [1]:

1. Текстильные обои с использованием в качестве лицевой стороны льносмесовых тканей. Волокнистые материалы, введенные в состав обоев, препятствуют распространению пожара благодаря наличию специальных огнестойких свойств.

2. Получение различных эфиров и составов используемых для получения пороха, клеев, химических волокон, лаков, красок, составов для добычи нефти.

3. Сырьё для получения нетканых материалов, применяемых при производстве, например, мебели, геотекстиля для укрепления насыпей, склонов, берегов водоемов путем создания травяных матов.

4. Раздробленная солома льна и костра являются материалом для выпуска волокнистых плит средней плотности. Волокнистые панели заняли ведущее положение в мебельной индустрии Европы. Из соломы льна получают качественные изоляционные панели – они легки, имеют низкую теплопроводность, что позволяет применять их в качестве утеплителей.

По данным Федерального государственного бюджетного учреждения «Агентство по производству и первичной обработке льна и конопли «Лен»» на территории Вологодской области строительный материал прямого назначения производится только для применения в деревянном строительстве как межвенцовый утеплитель [5], так называемая пакля. О других применениях в области строительных материалов неизвестно. Однако пакля практически выходит из употребления в строительстве из-за низких технических качеств и трудоемкости использования, уступая место более технологическим межвенцовым утеплителям.

С другой стороны, для реализации производства должны быть созданы условия обеспеченности необходимыми объёмами цемента, с учётом затрат на его доставку до производства. Иными словами, производство должно располагаться вблизи населённых пунктов с высоким обеспеченным спросом на строитель-

ные материалы, вблизи Вологды и Череповца. Наиболее удачным географическим положением обладают льнозаводы 1 (д. Батран, Череповецкий район), 2 (д. Прогресс, Шекснинский район) и 3 (д. Нифантово, территория льнозавода, Шекснинский район). Данные льнозаводы обладают высокими мощностями по переработке льнотресты: 1800, 2700, 2500 тыс. тонн соответственно для 1, 2 и 3. Это говорит о высоком уровне обеспеченности кострой при близком расположении к транспортным путям и г. Череповцу.

Для получения физико-механических свойств материала теоретически был подобран состав. В качестве исходных материалов были использованы: льняная костра, портландцемент (М500 Д0 ЦЕМ I 42,5), вода. С целью уточнения соответствия заявленных свойств исходного сырья портландцемент был проверен на прочность согласно ГОСТ 30744-2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка». Костра соответствует требованиям ГОСТ 19222-84 «Арболит и изделия из него. Общие технические условия». Таким образом, применяемые материалы соответствуют требованиям, оговоренным в нормах.

Состав № 1 получаемого материала на 1 м<sup>3</sup>:

1. Портландцемент М500 Д0 ЦЕМ I 42,5 – 294,5 кг.

2. Костра льняная – 125 кг.

3. Вода – 490 л.

Для состава № 2 количество костры было уменьшено до 115 кг.

Для снижения влияния углеводов, содержащихся в костре, применялся следующий метод: льняная костра перед замесом вымачивалась в известковом молоке 1 сутки.

Замес смеси проводился в следующем порядке: в бетоносмеситель подавалась костра и ¼ части воды, смесь перемешивалась 2 минуты, затем, не останавливая смеситель, подавалось вяжущее в течение 2 минут, далее продолжалось перемешивание в течение 2 минут, вводился остаток воды и после смесь перемешивалась в течение 4 минут и укладывалась по металлоформам.

Для испытаний на сжатие применялись образцы 100×100×100 мм, для проверки на теплопроводность применялись образцы согласно ГОСТ 7076-99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме». Данные результатов испытаний приводятся в таблице, рисунках 2 и 3.

Таблица

**Результаты испытания составов № 1 и № 2**

№ состава	№ образца	Плотность, ρ, кг/м <sup>3</sup>	Значение разрушающей нагрузки, F, кН	Значение прочности на сжатие, R, МПа	Коэффициент теплопроводности, λ, Вт/(м*К)
1	1	476,5	2	0,19	0,078
	2	483,5	1,5	0,14	0,064
	3	470	1,8	0,17	0,070
	среднее	476,7	-	0,17	0,0707
2	1	496,5	2,1	0,2	0,079
	2	493,5	2	0,19	0,069
	3	510,4	2,4	0,23	0,083
	среднее	500,1	-	0,21	0,077

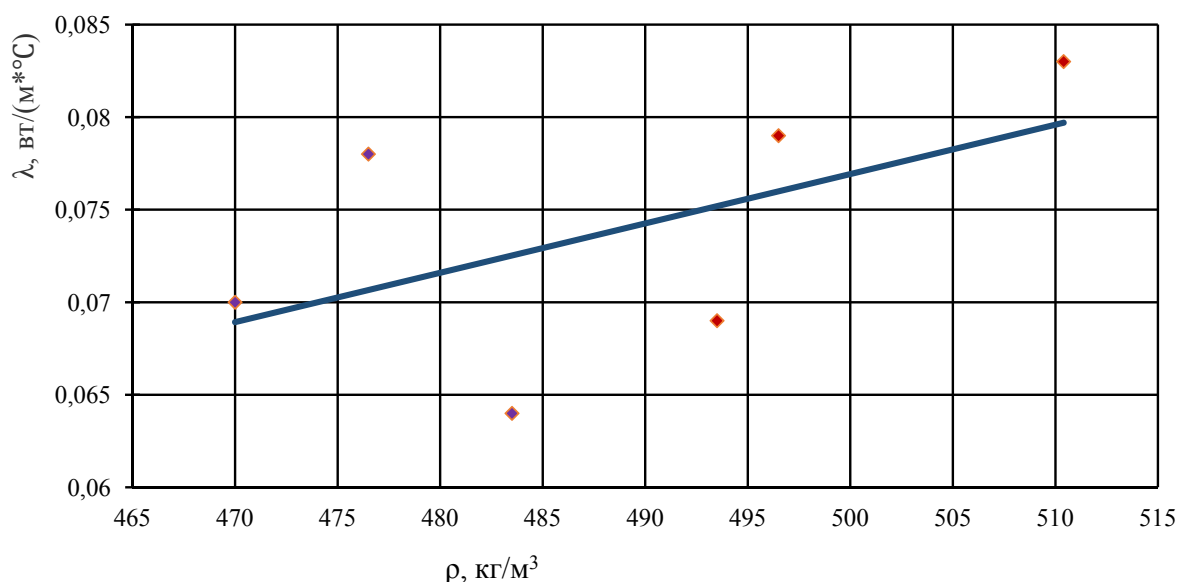


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности от плотности материала

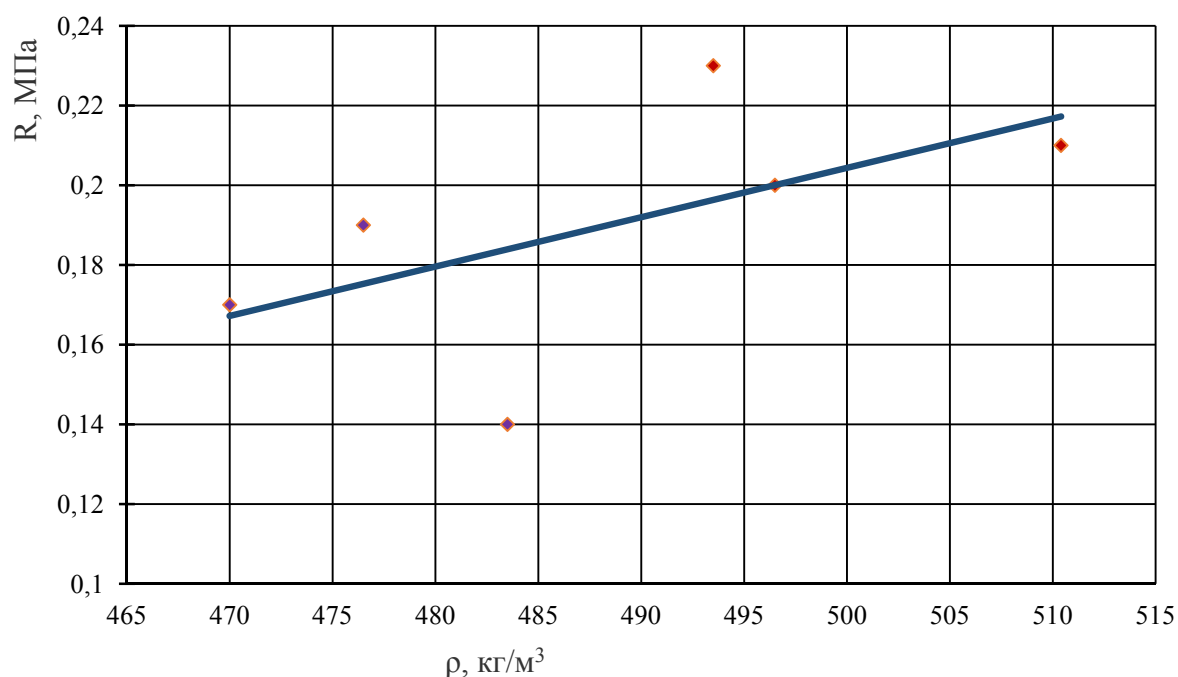


Рис. 3. Зависимость прочности на сжатие от плотности материала

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что данные материалы имеют возможность использования. Если сравнивать данные, полученные таким путём, с нормативными данными из ГОСТ 19222-84, то теплопроводность ниже оговоренной в стандарте (для плотности  $500 \text{ кг/м}^3$  –  $\lambda = 0,8 \text{ Вт/(м*К)}$ ).

Таким образом, на территории Вологодской области можно реализовать производство теплоизоляционных материалов на основе отходов льнопереработки. Данный материал, получаемый из костры путём смешивания с вяжущим, имеет конкурентоспособные теплофизические свойства.

### Литература

1. Беляков, Н. А. Экономические проблемы производства и переработки льна / Н. А. Беляков, П. М. Советов. – Вологда-Молочное : ФГОУ ВПО Вологодская государственная молочнохозяйственная академия им. Н. В. Верещагина, 2005. – 195 с.
2. В Вологодской области развивают льноводство // Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. – 2019. – 15 марта. // Официальный сайт министерства сельского хозяйства Российской Федерации. – URL: <http://mcx.ru/press-service/regions/vologodskoy-oblasti-razvivayut-lnovodstvo/> (дата обращения: 15.07.2019). – Текст : электронный.

3. Вологодская область в цифрах, 2018 : краткий статистический сборник / Вологдастат. – Вологда : 2019. – 148 с.

4. Мансалова, А. И. Урожайность и качество льна-долгунца в зависимости от погоды, сроков посева и уборки / А. И. Мансалова // Земледелие. – 2016. – № 8. – С. 29–31.

5. Перечень льноперерабатывающих предприятий (льнозаводов) льняного комплекса на

14.08.2017 г. // Официальный сайт Федерального государственного бюджетного учреждения «Агентство по производству и первичной обработке льна и конопли «Лен». – URL: <http://agentstvo-len.ru/perechen-lnopererabatyvayushchikh-predpriyatiy-lnozavodov-lnyanogo-kompleksa-na-01-01-2015-g> (дата обращения: 18.07.2019). – Текст : электронный.

*D.V. Kuznetsov, O.A. Povarova*

#### **USE OF FLAX SHIVE AS RAW MATERIAL FOR PLATE THERMAL INSULATOR PRODUCTION**

This article is an attempt to form the main points about the advisability of using flax shive in construction. The article considers the option of using shive from the production of flax as a plate thermal insulator. The results of thermophysical and physical-mechanical tests are given as arguments for the possible use of flax shive as a raw material for the production of thermal insulator.

Vologda region, shive, flax production waste, application of plant waste, construction materials.



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В статье рассмотрена проблема оценки длительной прочности бетона в железобетонных конструкциях. Приведены показатели длительной прочности бетона в процессе эксплуатации железобетонных колонн по четырём объектам.

Обследование, железобетонные конструкции, длительная прочность бетона.

Проектирование несущих железобетонных конструкций, подвергаемых длительному воздействию статических нагрузок, без учета длительности процессов этих явлений может привести к серьезным погрешностям при оценке длительной прочности, выносливости и пространственной жесткости несущих элементов зданий, так как влияние условий эксплуатации может привести как к увеличению прочности бетона, так и к снижению. Кроме условий эксплуатации при оценке остаточной несущей способности конструкций оказывают влияние и изменения в нормативной литературе. Изучение вопроса длительной прочности железобетонных конструкций в различных условиях поможет более точно подобрать класс бетона конструкции и расчетные параметры при обследовании зданий.

В процессе обследования зданий была оценена прочность бетона колонн следующих несущих конструкций:

- в 2007 году были обследованы конструкции здания скипового подъемника доменного цеха ОАО «Северсталь», введенного в эксплуатацию в 1955 году. Период эксплуатации составил 52 года (1 объект);

- в 2009 году были обследованы железобетонные конструкции литейного корпуса № 1 ООО «Ферумплав» в Вологде, введенного в эксплуатацию в 1987 году. Срок эксплуатации 22 года (2 объект);

- в 2013 году был обследован сборочный корпус № 2 «Сухонского целлюлозно-бумажного комбината», построен в 1956 году. Период эксплуатации составил 57 лет (3 объект);

- в 2019 году были обследованы несущие железобетонные конструкции одноэтажного гаража в с/п

Нелазское Череповецкого района Вологодской обл., введенного в эксплуатацию в 1976 г. Срок эксплуатации – 43 года (4 объект).

Во всех обследуемых зданиях была произведена оценка прочности бетона колонн:

- проектная марка бетона колонн по прочности 1 объекта на сжатие М150 с нормативным сопротивлением бетона сжатию  $R_{np}^H = 85$  кгс/см<sup>2</sup>, нормативной кубиковой прочностью бетона  $R^H = 116$  кгс/см<sup>2</sup> и призмной прочностью  $R_{np} = 70$  кгс/см<sup>2</sup> [1];

- проектный класс бетона колонн по прочности В22,5, что соответствует марке бетона М300 2 объекта на сжатие с параметрами  $R_{np}^H = 170$  кгс/см<sup>2</sup>,  $R^H = 232$  кгс/см<sup>2</sup> и  $R_{np} = 135$  кгс/см<sup>2</sup> [2];

- проектная марка бетона колонн по прочности 3 объекта на сжатие М200 с параметрами  $R_{np}^H = 115$  кгс/см<sup>2</sup>,  $R^H = 155$  кгс/см<sup>2</sup> и  $R_{np} = 90$  кгс/см<sup>2</sup> [1];

- проектный класс бетона колонн по прочности 4 объекта на сжатие В15 с параметрами  $R_{en} = 9,5$  МПа и  $R_g = 8,5$  МПа [3], что соответствует проектной марке бетона М200.

Конструкции 1 и 3 объектов были рассчитаны по СНиП II-V.1-62\*, 2 объекта – по СНиП II-21-75 [1]. Конструкции 4 объекта были рассчитаны по СНиП 2.03.01-84\* [2], в котором марки бетона заменены на классы.

В связи с введением нового СНиПа [2] и СП 63.13330.2012 [4] был проведен анализ изменения нормативной прочности бетона, который приведен в таблице 1.

Таблица 1

### Прочность бетона

Марка бетона по прочности на сжатие	Класс бетона по прочности на сжатие	Отличие от марки бетона, %	$R_{np}^H$ кгс/см <sup>2</sup> по СНиП II-21-75 [1]	$R_{en}$ по СНиП 2.03.01-84 [2]	$R_{en}$ , МПа по СП 63.13330.2012 [4]
М150	В10	-12,7	85	$\frac{7,5}{76,5}$	7,5
М200	В15	-1,8	115	$\frac{11,0}{112}$	11,0
М300	В25 В22,5	+9,1 -1,8	170 -	$\frac{18,5}{189}$	18,5 -

\* – над чертой значение в МПа, под чертой – в кгс/см<sup>2</sup>.

Из таблицы видно, что нормативная прочность бетона изменилась в 1984 году, т.е. здания, построенные ранее, имеют небольшой запас прочности бетона для марок М150 и М200, а для марки бетона М300 ближе по прочности подходит класс В22,5, но в настоящее время данный класс исключен из классификации бетонов. Таким образом, для марки бетона М300 нормативная прочность при расчетах ниже на 8%, чем заложена при проектировании.

На первом и втором объектах прочность бетона колонн определялась с помощью ультразвукового прибора «Пульсар 1.0». На третьем объекте обследование проводилось с помощью прибора «ИПС-МГ 4» 2012 года выпуска. На четвертом объекте фактическая прочность бетонов конструкций определялась электронным измерителем прочности «ИПС-МГ4.01», выпускаемом ООО «Стройприбор».

Условия эксплуатации на всех объектах нормальные, так как здания отапливаемые и в них не наблюдалось резких перепадов температур и влажности. Однако при обследовании были обнаружены раковины в бетоне колонн, повреждения защитного слоя, при этом не выявлено кренов колонн, искривлений (выгибов) ни в одной плоскости, что свидетельствует о работоспособном состоянии колонн, фундаментов и оснований на всех четырех объектах.

Фактически полученные значения прочности бетона колонн составили:  
- первый объект: бетон марки М150 (табл. 2);

Таблица 2

**Экспериментальная прочность бетона 1 объекта**

Номер колонны	1	2	3
1. $R_m$ МПа – сопротивление бетона по результатам обследования	21,39	20,17	24,23
2. $R_{np}^n$ МПа – сопротивление бетона с учетом коэффициента 0,778	16,68	15,69	18,85
3. % расхождения от $R_{np}^n = 8,5$ МПа по марке бетона	+96	+85	+122

- второй объект: бетон марки М300 (табл. 3);

Таблица 3

**Экспериментальная прочность бетона 2 объекта**

Номер колонны	1	2	3	4	5
1. $R_m$ МПа – сопротивление бетона по результатам обследования	19,63	21,54	20,96	22,15	23,18
2. $R_{np}^n$ МПа – сопротивление бетона с учетом коэффициента 0,778	15,27	16,76	16,31	17,23	18,03
3. % расхождения от $R_{np}^n = 17$ МПа по марке бетона	-10	-1	-4	+1	+1

- третий объект: бетон марки М200 (табл. 4);

Таблица 4

**Экспериментальная прочность бетона 3 объекта**

Номер колонны	1	2	3	4	5	6	7
1. $R_m$ МПа – сопротивление бетона по результатам обследования	13,6	12,7	18,5	19,9	27,5	31,5	19,7
2. $R_{np}^n$ МПа – сопротивление бетона с учетом коэффициента 0,778	10,58	9,88	14,39	15,48	21,40	24,51	15,33
3. % расхождения от $R_{np}^n = 11,5$ МПа по марке бетона	-8	-14	+25	+35	+86	+113	+33

- четвертый объект: класс бетона В15 (табл. 5);

Таблица 5

**Экспериментальная прочность бетона 4 объекта**

Номер колонны	1	2	3	4	5	6
1. $R_m$ МПа – сопротивление бетона по результатам обследования	29,7	32,8	53,2	27,2	26,6	44,3
2. $R_{np}^n$ МПа – сопротивление бетона с учетом коэффициента 0,778	23,1	25,5	41,39	21,16	20,69	34,47
3. % расхождения от $R_{np}^n = 9,5$ МПа по марке бетона	143	169	336	86	118	263

## Длительная прочность бетона

Авторы	А.А. Гвоздев	О.Я. Берг	А.В. Яшин	К.В. Сахновский	По результатам испытаний	Класс бетона по результатам испытаний по СП 63.13330.2012
1	2	3	4	5	6	7
Формулы длительной прочности	$0,8R_{np}$ (МПа)	$0,85R_{np}$ (МПа)	$[0,92 - 0,04(\lg t - \tau)] \times R_{np}$ МПа	$0,7R_{28} \lg n$ МПа	$R_{вп}$	
1 объект (марка М150)	$\frac{6,8}{6}$	$\frac{7,2}{6,4}$	$\frac{6,4}{5,6}$	$\frac{26,6}{22,5}$	16,90	В20 (+12,9%)
2 объект (марка М300)	$\frac{13,6}{14,8}$	$\frac{14,5}{15,7}$	$\frac{15,5}{15,1}$	$\frac{46,5}{45,1}$	14,50	В20 (+3,5%)
3 объект (марка М200)	$\frac{9,2}{8,8}$	$\frac{9,8}{9,4}$	$\frac{8,8}{9,0}$	$\frac{34,8}{36,1}$	8,29	В20 (+3,5%)
4 объект (класс бетона В15)	$\frac{7,6}{7,6}$	$\frac{8,1}{8,1}$	$\frac{8,3}{8,3}$	$\frac{25,0}{25,0}$	24,44	В30 (+11%)

Примечание:

- в скобках указан процент расхождения нормативной прочности бетона;
- n – продолжительность эксплуатации в днях;
- t – возраст бетона;
- $\tau$  – возраст бетона в момент загрузки, в расчетах принят за 28 суток.

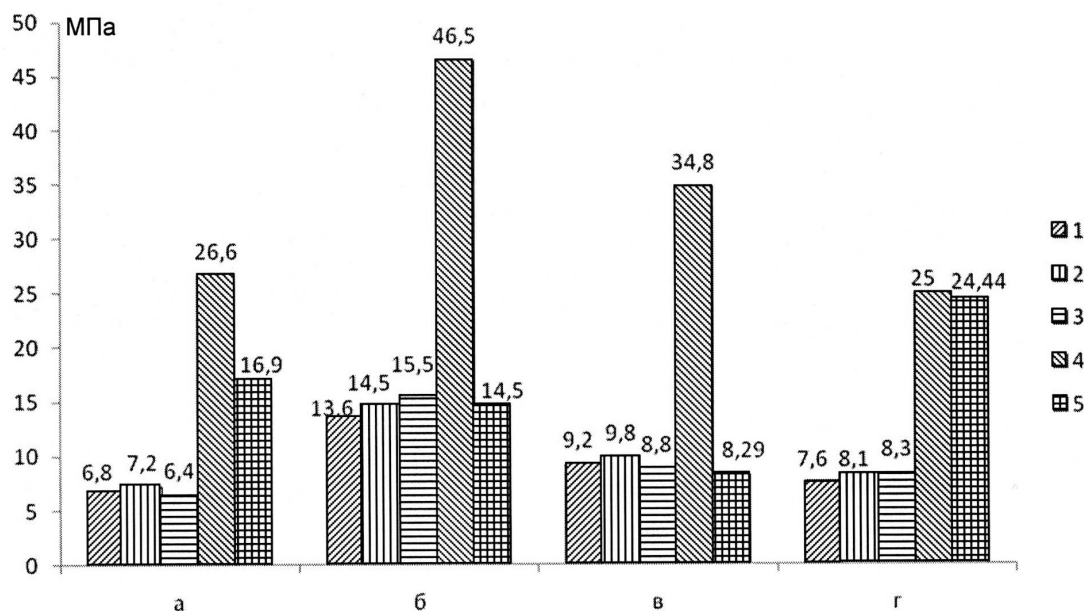


Рис. Длительная прочность бетона:  
а – для бетона марки М150; б – для бетона марки М200; в – для бетона марки М300;  
г – для бетона марки В15; 1, 2, 3, 4, 5 – номера столбцов таблицы 6

По результатам испытаний была выполнена статистическая обработка и занесена в таблицу 6 по следующему методике.

Среднее значение прочности бетона:

$$\bar{R} = \frac{\sum R_i}{n}, \quad (1)$$

где  $n$  – число измерений (образцов).

Среднеквадратичное отклонение частных значений прочности бетона от среднего значения  $\sigma_R$  определяется по формуле:

$$\sigma_R = \sqrt{\frac{\sum (R_i - \bar{R})^2}{n-1}}. \quad (2)$$

Коэффициент вариации контролируемых характеристик  $V_R$  определяется в соответствии с общими

правилами статистической обработки результатов измерений по формуле:

$$V_R = \frac{\sigma_R}{\bar{R}}. \quad (3)$$

Нормативные сопротивления бетона определяют по формуле:

$$R_{en} = \bar{R}(1 - kV_R), \quad (4)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от обеспеченности нормативного сопротивления бетона. При обеспеченности  $q = 90\%$ , принимаемой в соответствии со СНиП 2.06.08-87 для массивных сооружений,  $k = 1,28$ . При обеспеченности  $q = 95\%$ ,  $k = 1,64$ .

По значению  $R_{en}$  при обследовании железобетонных конструкций определяется класс бетона по проч-

ности на сжатие. Далее для данного класса бетона определяются расчетные сопротивления бетона и остаточная несущая способность.

Длительная прочность бетона изучается с пятидесятих годов прошлого столетия. Этой проблемой занимались А.А., Гвоздев, О.Я. Берг, А.В. Яшин, К.В. Сахновский и другие [3]. Каждый автор предложил свою формулу для определения длительной прочности (результаты оценки длительной прочности приведены в таблице 6). Результаты расчетов приведены на рисунке, по которым четко прослеживаются следующие закономерности:

- длительная прочность бетона, определенная по формулам А.А. Гвоздева, О.Я. Берга и А.В. Яшина, не учитывает повышение прочности бетона при длительной эксплуатации;

- длительная прочность бетона, определенная по формуле К.В. Сахновского, учитывает повышение длительной прочности бетона и совпадает с экспериментальными данными. Возможно, данное совпадение объясняется более точными измерениями прибора НПМ-МГ4.01, но только в одном объекте, на трех других оно дает значительное увеличение, не соответствующее экспериментальным данным.

Выводы по работе:

1. При оценке длительной прочности бетона колонн происходит нарастание прочности, которое более характерно для марок бетона М150, М200, что соответствует классам бетона В10 и В15.

2. При оценке длительной прочности бетона марки М300 динамики нарастания прочности не наблюдалось.

3. Прогнозирование длительной прочности для железобетонных конструкций в настоящее время не дает сходимых результатов с экспериментальными исследованиями и требует дальнейшего изучения данной тематики.

## Литература

1. СНиП II – 21-75. Бетонные и железобетонные конструкции : введен 1977-01-01. – Москва : Стройиздат, 1986. – 90 с.

2. СНиП 2.03.01-84. Бетонные и железобетонные конструкции : введен 1986-01-01. – Москва : Стройиздат, 1985. – 79 с.

3. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции : введен 2004-03-01. – Москва : ФГУП ЦПП, 2003. – 24 с.

4. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции, актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 : введен 2013-01-01. – Москва : Минрегион России, 2011. – 155 с.

5. Берг, О. Я. Высокопрочный бетон / О. Я. Берг, Е. Н. Щербаков, Г. Н. Писанко – Москва : Стройиздат, 1971. – 209 с.

*N.V. Mikhalevich, E.N. Shakhova*

## DETERMINATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES STRENGTH IN LONG-TERM OPERATION CONDITIONS

The article considers the problem of evaluation of long-term strength of concrete in reinforced concrete structures. Indicators of long-term strength of concrete during operation of reinforced concrete columns for four objects are given.

Inspection, reinforced concrete structures, long-term strength of concrete.



*Л.И. Огородов<sup>1</sup>, В.А. Шапкина<sup>2</sup>*  
<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
<sup>2</sup>Вологодский государственный университет

## ПОВРЕЖДЕННОСТЬ СТАЛИ 45 ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ МЯГКОГО МАЛОЦИКЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

Приводятся результаты расчета меры повреждений стали 45 на момент разрушения при нестационарных режимах мягкого малоциклового нагружения по кинетическим уравнениям силовой модели повреждений наследственного типа.

Поврежденность, сталь, нестационарные режимы, мягкое малоцикловое нагружение, разрушение.

### Введение

Исследования в области малоциклового усталости вызваны необходимостью получения экспериментальных данных для прочностных расчетов высоконапряженных элементов конструкций, материал которых работает за пределом текучести.

Для описания процесса разрушения при малоциклового нагружении применяются как деформационные (С. Нэнсон, Л. Коффин, В.В. Новожилов, В.Е. Серенсен, В.Т. Трошенко, Г.Г. Медекша, Н.А. Махутов и др.), так и энергетические (И. Морроу, В.В. Москвитин, Л.Н. Романов, П.А. Павлов и др.) критерии разрушения. Накоплен обширный экспериментальный материал по малоциклового усталости при жестком нагружении. Однако влияние асимметрии цикла нагружения на малоциклового долговечность изучено значительно меньше, особенно при мягком режиме нагружения. Перспективными являются энергетические подходы, так как необратимая работа циклического деформирования является инвариантной величиной, которая определяется по уравнению механических состояний материала при любом напряженном состоянии. Экспериментальной базой для определения параметров кинетического уравнения повреждений служат кривые усталости, построенные при различных коэффициентах асимметрии циклов нагружения. Уравнения кривых усталости используются в силовой модели повреждений.

В настоящей работе представлены результаты расчета меры повреждений стали 45 при нестационарных режимах мягкого малоциклового нагружения по кинетическим уравнениям силовой модели повреждений наследственного типа. Результаты расчета сопоставлены с данными работ других авторов.

Актуальность использования предложенных уравнений повреждений заключается в учете истории нагружения материала и элемента конструкции в условиях сложных режимов нагружения и эксплуатации.

### Применяемые кинетические уравнения повреждений

Феноменологическое описание стадии диссеминированных повреждений основывается на представлении поврежденности как особом механическом со-

стоянии элемента сплошной среды. Аналитические зависимости для описания повреждений могут либо вытекать из физических соображений, либо должны строиться на некоторых механических моделях процессов длительного разрушения. Модель длительного разрушения предполагает одновременное протекание двух и более процессов разрушения, которые накладываются или взаимодействуют друг с другом. В этих случаях приходится прибегать к комбинированным уравнениям повреждений.

Обратимся к мало- и многоциклового усталости материала, когда в качестве независимой кинетического уравнения используется число циклов нагружения. Кинетическое уравнение повреждений силового типа можно представить в виде

$$\Pi = \int_0^N f(\sigma_{\max}, R) dN, \quad (1)$$

где  $R$  – коэффициент асимметрии цикла.

В случае ступенчатого режима циклического нагружения используется известная формула Майнера линейного суммирования повреждений

$$\Pi = \sum_{k=1}^m \frac{N_k}{N_{pk}(\sigma_{k\max}, R_k)}, \quad (2)$$

где  $m$  – число ступеней нагружения.

При оценке общей поврежденности переходные циклы сбрасываются со счета. Для определения разрушающих чисел циклов  $N_{pk}$  требуется располагать набором кривых усталости при различных значениях  $R$ .

Другое силовое уравнение повреждений имеет вид

$$\Pi = \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}_p} + \sum_{k=1}^m f(\sigma_{k\max}, R_k) N_k, \quad (3)$$

где  $\bar{\sigma}_p$  – истинное сопротивление разрыву.

Формула суммирования повреждений при ступенчатом режиме повреждения имеет вид

$$\Pi = \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}_p} + \sum_{k=1}^m \left( 1 - \frac{\sigma_{k\max}}{\bar{\sigma}_p} \right) \frac{N_k}{N_{pk}}. \quad (4)$$

Уравнение повреждений малоциклового усталости строится также с использованием энергетической модели разрушений [1]

$$\Pi = \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}_p} + \sum_{\kappa=1}^N f \left( \frac{\Omega_{\kappa}}{\omega_p} \right) + \sum_{\kappa=1}^N \varphi \frac{\omega_{\kappa}}{\omega_p}, \quad (5)$$

где  $\Omega_{\kappa}$  – работа одностороннего пластического деформирования в цикле нагружения,  $\omega_{\kappa}$  – работа циклического деформирования,  $\omega_p$  – предельная работа статического деформирования в эквивалентных температурных условиях нагружения.

В работах [2, 3] процесс накопления повреждений сталей и сплавов описан при помощи кинетических уравнений наследственного типа, которые для данного случая можно представить в виде

$$\Pi = \int_0^N \sigma_{\varepsilon \max}(n, R) M(N-n) dn, \quad (6)$$

где  $N$  – количество циклов нагружения, отсчитываемое от начала нагружения,  $n$  – число циклов на данный момент времени, отсчитываемое от заданного момента режима к началу нагружения. Ядро  $M(N-n)$  определяется по усталостной кривой, отвечающей 50% вероятности разрушения и соответствующему коэффициенту асимметрии цикла  $R$ , а  $\sigma_{\varepsilon \max}$  – эквивалентное напряжение, в частности по критерию Писаренко-Лебедева или применительно к данной работе  $\sigma_{\varepsilon \max} = \sigma_{i \max}$  ( $\sigma_{i \max}$  – интенсивность напряжений).

Если кривая усталости материала при каком-либо одном значении  $R$  описывается в полулогарифмических координатах линейной зависимостью

$$\sigma_{i \max} = C_R - D_R \lg N, \quad (7)$$

то ядро уравнения (6) выражается в виде

$$M(N-n) = \frac{D_R \lg e}{(N-n)[C_R - D_R \lg(N-n)]^2} \quad \text{или}$$

$$M(v) = \frac{0,434 D_R}{v[C_R - D_R \lg v]^2}, \quad (8)$$

где  $v = (N - n)$ .

Для случая режима ступенчатого нагружения, при котором интенсивность напряжений  $\sigma_{i \max}$  и коэффициент асимметрии цикла сохраняют на протяжении определенного количества циклов постоянные значения, имеем

$$\Pi = \sigma_{i \max} \left[ \frac{1}{\sigma_{ip}(v_1)} \right] +$$

$$+ \sum_{\kappa=2}^m \sigma_{i \max \kappa} \left[ \frac{1}{\sigma_{i \max p}(v_{\kappa})} - \frac{1}{\sigma_{i \max}(v_{\kappa-1})} \right], \quad (9)$$

где  $V_{\kappa}$  – количество циклов, отвечающее началу  $\kappa$ -той ступени, причем номер ступени нагружения отсчитывается от заданного момента к началу нагружения.

Уравнения (6) и (9) можно применять лишь при наличии кривых усталости для всех встречающихся при данном режиме нестационарного нагружения и коэффициента асимметрии цикла.

По аналогии с (3) и (4) представляется возможным использовать комбинированное уравнение повреждений

$$\Pi = \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}_p} + \int_0^N \left( 1 - \frac{\sigma_{\max}}{\bar{\sigma}_p} \right) \sigma_{\varepsilon \max}(n, R) M(N-n) dn, \quad (10)$$

где  $\bar{\sigma}_p$  – истинное напряжение разрыва образца, определяемое из опыта ( $\bar{\sigma}_p = 1058$  МПа [1]).

### Используемые экспериментальные результаты

В задачи работ [4, 5] входило построение варианта инженерного расчета на малоцикловую усталость стали 45 при произвольном напряженном состоянии в отсутствии ползучести. Экспериментальное исследование проводилось в лаборатории сопротивления материалов СПбГПУ на серийной испытательной машине УМЭ-10ТМ с использованием специального оборудования [4, 5].

Образцы изготавливались из круглых прутков одной плавки. Перед чистовой механической обработкой заготовки стали 45 подвергались нормализации (нагрев до 850 °С, выдержка 1,5 часа и охлаждение на воздухе), обеспечивающей стабильность структуры в процессе испытаний. Допуск на разностенность по длине (40 мм) и диаметру (18С<sub>3</sub> и 15А<sub>3</sub>) рабочей части образца составлял 0,2 мм. Все испытания проводились при мягком режиме нагружения с заданием напряжений с частотой 3–5 циклов в минуту при комнатной температуре.

Получены кривые малоциклового усталости при мягком режиме нагружения с различными значениями коэффициента асимметрии цикла  $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$  и соотношения  $K_{\sigma} = \tau / \sigma$  (табл. 1).

Предложено кинетическое уравнение малоциклового усталостных повреждений энергетического типа (5), которое проверялось экспериментально при сложных нестационарных режимах нагружения.

Коэффициенты уравнений кривых усталости согласно позициям 1–6 определены на основе обработки результатов опытов работы [4], а по позициям 7–10 коэффициенты получены по аналогии с уравнениями 1–6.

По результатам работы [5] получены коэффициенты уравнений кривых усталости  $\sigma_{i \max} = C - D \lg N$  стали 45 при коэффициенте асимметрии цикла  $R = -1$  и значениях  $K_{\sigma} = \tau / \sigma$ : при  $K_{\sigma} = 1,09$   $C = 868$  МПа,  $D = 156$  МПа; при  $K_{\sigma} = 0,77$   $C = 884$  МПа,  $D = 178$  МПа; при  $K_{\sigma} = 0,55$   $C = 865$  МПа,  $D = 172$  МПа; при  $K_{\sigma} = 0$   $C = 830$  МПа,  $D = 185$  МПа.

Уравнения кривых усталости стали 45

$\sigma_{\max} = C - D \lg N$				$\sigma_{i \max} = C - D \lg N$			
№ п/п	$R_{\sigma}$	$C, \text{МПа}$	$D, \text{МПа}$	N п/п	$R_{\sigma}$	$C, \text{МПа}$	$D, \text{МПа}$
1	-1,00	840	155	6	-1,00	983	217
2	-0,90	845	150	7	-0,90	989	217
3	-0,75	850	150	8	-0,75	995	217
4	-0,50	940	150	9	-0,50	1100	217
5	-0,25	1015	150	10	-0,25	1188	217

Таблица 2

Результаты расчета меры повреждений стали 45 при ступенчатых режимах циклического нагружения в условиях линейного напряженного состояния

№ п/п	№ ступени	Режимы нагружения [4]			Мера повреждений в момент разрушения по уравнениям				
		$\sigma_{\max}, \text{МПа}$	R	Число циклов	2	4	5 [4]	6–9	10
1	1	454	-0,90	60	0,875	0,950	1,057	1,132	1,053
	2	508		30					
	3	532		15					
	4	632		7					
2	1	454	-1,0	100	0,863	0,938	1,041	1,113	1,051
	2	508		50					
	3	582		8					
3	1	454	-0,73	200	0,877	0,944	1,004	1,115	1,052
	2	508		100					
	3	582		18					
4	1	454	-0,25	300	0,850	0,945	0,998	1,116	1,043
	2	508		250					
	3	582		270					
	4	638		125					
	5	670		7					
5	1	508	-0,25	400	1,235	1,122	1,028	0,968	0,984
	2		-0,50	150					
	3		-0,75	100					
	4		-1,00	48					
6	1	582	-0,25	100	1,044	1,020	1,015	1,055	1,025
	2		-0,75	25					
	3		-0,50	50					
	4		-0,90	17					
7	1	454	-0,50	400	0,969	0,986	1,038	1,055	1,025
	2	508	-0,75	50					
	3	582	-1,00	22					
8	1	454	-0,50	300	1,087	1,039	1,054	1,057	1,026
	2	508	-0,75	100					
	3	582	-1,00	18					

### Результаты расчетов меры повреждений стали 45 на момент разрушения при сложных режимах нагружения

Для сравнительного анализа расчетов меры повреждений в таблицах 2–5 представлены экспериментально полученные результаты разрушения образцов стали 45 на момент разрушения. Фиксация эмпирических данных проводилась при различных режимах сложного нагружения, отличающихся последовательностью приложения нагрузок, а также видом напряженного состояния материала (от линейного до плоского напряженного состояния). Мера повреждений оценивалась при различных комбинациях нормального и касательного напряжений по вышеописанным уравнениям, из которых уравнения (6), (9) и (10) применялись в этих условиях впервые.

Средние значения меры повреждений  $P_{CP}$  стали 45 и наибольшие отклонения меры повреждений  $\Delta P$

индивидуальных опытов от среднего значения меры  $P_{CP}$  представлены в таблице 6.

Для оценки эффективности применяемых для расчета уравнений проводилось сравнение расчетного значения меры  $P$  и  $P_{CP}$  с тем теоретическим значением  $P_T = 1$ , которое должно было бы наблюдаться при идеальном описании процесса разрушения. Так как в качестве параметров уравнений используются кривые циклической усталости, отвечающие 50% вероятности разрушения, то можно предполагать, что и при сложных нестационарных режимах нагружения условие разрушения отвечает той же вероятности. Эффективность анализируемых (сравниваемых) уравнений повреждений определяется также величинами отклонений  $\Delta P$  индивидуальных опытов от среднего значения меры повреждений.

Таблица 3

**Режимы нагружения стали 45 при ступенчатых режимах циклического нагружения  
в условиях плоского напряженного состояния и результаты расчета меры повреждений материала  
на момент разрушения**

№ режи-ма	№ ступе-ни	Режимы нагружения [4]										Мера повреждений в момент разрушения по уравнениям				
		$\sigma$ , МПа	$\tau$ , МПа	$\sigma_i$ , МПа	R	Число цик-лов	$\sigma$ , МПа	$\tau$ , МПа	$\sigma_i$ , МПа	R	Число цик-лов	2	4	5 [4]	6-9	10
1	1-2	237	258	508	-1,0	60	272	296	582	-1,0	12	0,559	0,801	0,981	0,992	0,996
2	1-2	213	252	454	-1,0	100	272	296	582	-1,0	17	0,606	0,822	0,975	1,029	1,013
3	1-2	582	-	582	-1,0	20	272	296	582	-1,0	10	0,575	0,809	0,955	0,952	0,979
4	1-2	508	-	508	-1,0	60	237	258	508	-1,0	38	0,679	0,833	0,942	0,956	0,977
5	1-2	508	-	508	-0,75	100	508	-	508	-1,0	30					
	3-4	237	258	508	-0,75	7	508	-	508	-0,75	56	1,080	1,042	0,926	1,062	1,032
6	1-2	454	-	454	-0,75	100	508	-	508	-1,0	50					
	3	272	296	582	-1,0	10	-	-	-	-	-	0,732	0,879	0,992	1,058	1,026
7	1-2	454	-	454	-0,5	300	508	-	508	-0,5	150					
	3-4	582	-	582	-0,75	25	297	324	634	-1,0	4	0,877	0,951	1,007	1,114	1,046
8	1-2	582	-	582	-0,25	10	237	258	508	-1,0	20					
	3	272	296	580	-1,0	14	-	-	-	-	-	0,341	0,703	0,898	0,881	0,947
9	1-2	580	-	580	-0,75	44	272	296	582	-0,75	11	0,850	0,992	0,936	0,985	0,993

Таблица 4

**Режимы нагружения стали 45 при ступенчатых режимах циклического нагружения  
в условиях плоского напряженного состояния и результаты расчета меры повреждений материала  
на момент разрушения**

№ режи-ма	№ ступе-ни	Режимы нагружения [4]										Мера повреждений в момент разрушения по уравнениям				
		$\sigma$ , МПа	$\tau$ , МПа	$\sigma_i$ , МПа	R	Число цик-лов	$\sigma$ , МПа	$\tau$ , МПа	$\sigma_i$ , МПа	R	Число цик-лов	2	4	5 [4]	6-9	10
1	1-2	580	-	580	-0,75	44	272	296	580	-0,75	11	0,832	0,924	0,936	0,985	0,993
2	1-2	190	207	405	-0,5	700	582	-	582	-0,5	121	0,686	0,859	0,946	1,148	1,066
3	1-2	272	296	580	-0,5	42	582	-	582	-0,5	248	1,190	1,086	0,979	1,240	1,108
4	1-2	236	258	505	-0,5	300	505	-	505	-0,5	200					
	3	236	258	505	-0,5	124	-	-	-	-	-	1,020	1,010	0,909	1,024	1,012
5	1-2	508	-	508	-0,75	50	237	258	508	-0,75	50					
	3-4	582	-	582	-0,5	50	272	296	580	-0,5	74	1,056	1,025	0,981	1,140	1,063

Таблица 5

**Режимы нагружения стали 45 при ступенчатых режимах циклического нагружения в условиях плоского напряженного состояния и результаты расчета меры повреждений материала  
на момент разрушения**

№ режи-ма	№ ступе-ни	Режимы нагружения [5], R=-1										Мера повреждений в момент разрушения по уравнениям				
		$\sigma$ , МПа	$\tau$ , МПа	$\sigma_i$ , МПа	$K_\sigma$	Число цик-лов	$\sigma$ , МПа	$\tau$ , МПа	$\sigma_i$ , МПа	$K_\sigma$	Число циклов	2	4	5 [5]	6-9	10
1	1-2	237	258	508	1,09	60	272	296	580	1,09	12	0,446	0,759	0,981	0,982	0,992
2	1-2	272	296	580	1,09	12	237	258	508	1,09	140	0,860	0,937	1,058	0,958	0,981
3	1-2	227,5	175	380	0,77	150	266	209	450	0,77	75	1,241	1,111	1,100	1,187	1,086
	3-4	320	246	540	0,77	50	344	265	570	0,77	23					
4	1-2	320	246	540	0,77	30	344	265	570	0,77	20	1,337	1,155	1,070	0,910	0,958
	3-4	266	205	450	0,77	75	227,5	175	360	0,77	250					
5	1-2	263	145	360	0,55	450	290	160	400	0,55	106	0,816	0,894	1,089	1,082	1,047
	3	325	180	450	0,55	22	-	-	-	-	-					
6	1-2	325	180	450	0,55	43	290	160	400	0,55	106	0,897	0,041	1,092	0,936	0,964
	3	263	145	360	0,55	450	-	-	-	-	-					

**Результаты расчета меры повреждений стали 45  
при исследованных режимах сложного нагружения**

№ таблицы	Напряженное состояние	Параметры	Мера повреждений и отклонения от среднего значения по уравнениям				
			2	4	5 [4, 5]	6–9	10
2	Линейное напряженное состояние	$P_{CP}$	0,975	0,933	1,029	1,076	1,032
		$+\Delta P$	0,260	0,129	0,028	0,056	0,021
		$-\Delta P$	0,125	0,055	0,031	0,108	0,048
3	Плоское напряженное состояние	$P_{CP}$	0,700	0,866	0,957	1,003	1,001
		$+\Delta P$	0,380	0,176	0,050	0,111	0,045
		$-\Delta P$	0,359	0,163	0,059	0,122	0,054
4	Плоское напряженное состояние	$P_{CP}$	0,957	0,979	0,950	1,107	1,048
		$+\Delta P$	0,233	0,107	0,031	0,132	0,060
		$-\Delta P$	0,271	0,120	0,941	0,122	0,055
5	Плоское напряженное состояние	$P_{CP}$	0,936	0,966	1,065	1,009	1,005
		$+\Delta P$	0,401	0,189	0,085	0,178	0,081
		$-\Delta P$	0,470	0,207	0,084	0,099	0,047

Таким образом, предоставленные в таблицах результаты свидетельствуют об эффективности предложенных уравнений повреждений в условиях сложных режимов нагружения и эксплуатации стали 45.

#### Выводы

Уравнения повреждений силовой модели разрушения (2) и (4) с меньшей точностью, чем уравнения (5), (6) и (10), определяют момент разрушения стали 45 при нестационарных режимах мягкого малоциклового нагружения. Для определения параметров кинетического уравнения (5) энергетической модели разрушения необходим комплекс испытаний [1]. При более длительных режимах малоциклового нагружения с промежуточными продолжительными разгрузками уравнения наследственного типа (6) и (10) имеют преимущества. Кинетические уравнения силовой модели разрушения наследственного типа успешно используются в составе комбинированных уравнений повреждений.

#### Литература

1. Павлов, П. А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность / П. А. Павлов. – Ленинград : Машиностроение, 1988. – 252 с.

2. Огородов, Л. И. Экспериментальная проверка применимости кинетического уравнения повреждений наследственного типа для расчета момента разрушения жаропрочного сплава в условиях ползучести / Л. И. Огородов, С. Я. Куранаков // Вестник машиностроения. – 1995. – № 10. – С. 26–28.

3. Огородов, Л. Н. Экспериментальная проверка применимости уравнений повреждений наследственного типа для оценки момента разрушения сталей и сплавов в условиях высокотемпературной ползучести при нестационарных режимах нагружения / Л. Н. Огородов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1996. – № 4. – С. 98–107.

4. Пенкин, А. Н. Малоцикловая усталость конструкционной стали при сложном напряженном состоянии : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пенкин Александр Николаевич. – Ленинград, 1984. – 18 с.

5. Абдель, Ф. М. Малоцикловая усталость конструкционной стали и титанового сплава при сложном напряженном состоянии и нестационарном нагружении : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Абдель Фатах Мустафа. – Ленинград, 1985. – 18 с.

*Ogorodov L.I., Shapkina V.A.*

#### DAMAGE TO STEEL 45 IN NON-STATIONARY MODES OF SOFT LOW-CYCLE LOADING

The results of calculating the damage to steel 45 at the time of destruction under non-stationary modes of soft low-cycle loading using the kinetic equations of the power model of damage of the hereditary type are presented.

Damage, steel, non-stationary modes, soft low-cycle loading, destruction.



## ПРОИЗВОДИТЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ ПРИ СОРТИРОВКЕ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

В статье приводится описание способа снижения непроизводительной мощности вибрационных сортировальных машин за счет смещения фаз колебаний. Представлена методика оценки влияния смещения фаз колебаний на характеристику изменения мощности сортировальной машины. Доказана возможность снижения неравномерности производительной (активной) мощности при сортировке сыпучих материалов с одновременным уменьшением ее пикового значения почти на тридцать процентов.

Сортировка сыпучих материалов, строительные материалы, колебания, фаза, смещение, самонейтрализация, реактивная, активная мощность.

При сортировке различных сыпучих материалов зачастую используют вибрационные сортировальные машины. Качество и стоимость сортируемых материалов напрямую зависит от характеристик используемых сортировальных машин. В существующих вибрационных сортировальных машинах часто используют два массивных рабочих органа, колебания которых вместе с сыпучим материалом [1] осуществляются в противофазе, что приводит к развитию существенной непроизводительной реактивной механической мощности [2]. Смещение фаз колебаний на девяносто градусов приводит к полной самонейтрализации этой мощности [3]. Этим положительное влияние смещения фаз колебаний не ограничивается

Цель исследования состоит в установлении влияния смещения на девяносто градусов фаз колебаний массивных рабочих органов [4] на производительную

(активную) мощность [5, 6] при сортировке сыпучих материалов.

**Производительная (активная) мощность при штатных колебаниях рабочих органов (смещение фаз –  $\pi$ ).** Выражение для мощности в этом случае имеет вид:

$$p_{z\pi} = 2P_{z\max} |\cos \omega \cdot t|,$$

где  $P_{z\max}$  – амплитуда активной (тепловой) мощности для одного рабочего органа. На рисунке 1 представлен график этой мощности.

Пиковая суммарная мощность для этого случая равна

$$P_{z\pi\max} = 2P_{z\max}.$$

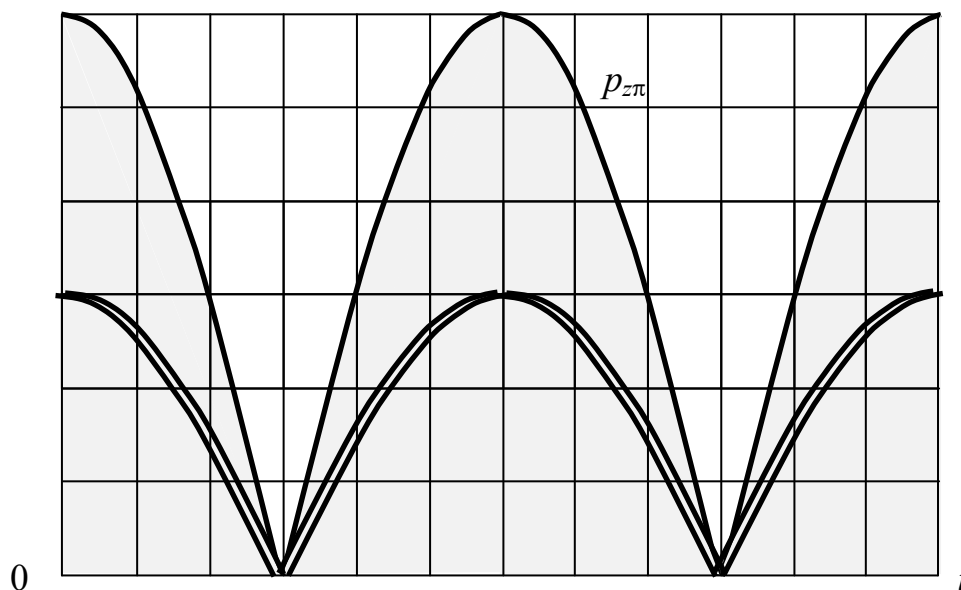


Рис. 1. Активная мощность. Смещение фаз –  $\pi$

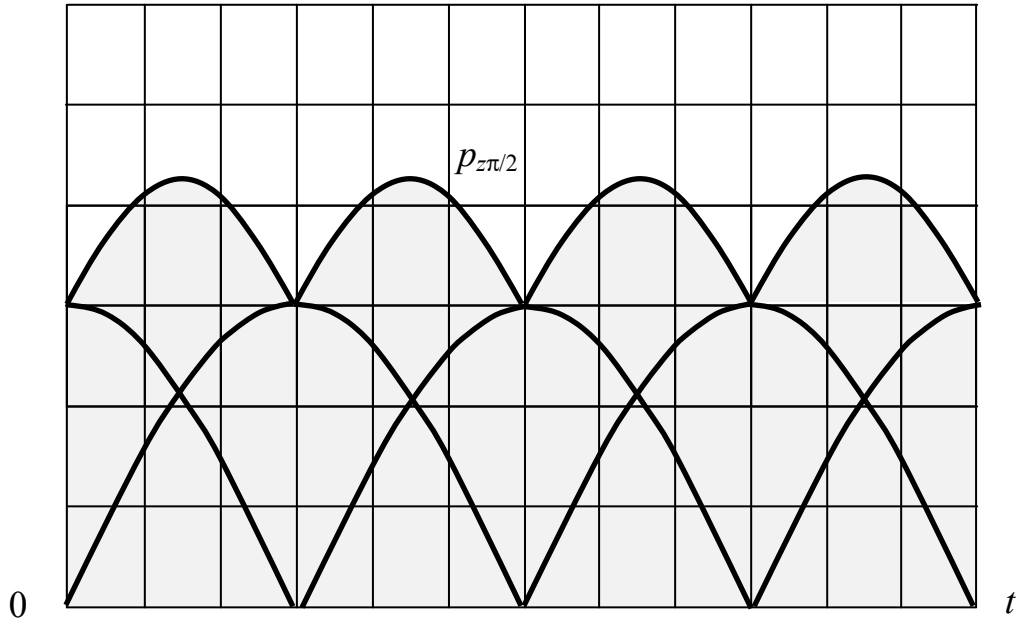


Рис. 2. Активная мощность. Смещение фаз –  $\pi/2$

**Производительная (активная) мощность при смещении фаз на  $\pi/2$ .** Выражение для мощности в этом случае имеет вид:

$$\begin{aligned}
 P_{z\pi/2} &= P_{z\max} (|\cos \omega \cdot t| + |\sin \omega \cdot t|) = \\
 &= \sqrt{2} P_{z\max} \sin \left[ \left( \omega \cdot \tau + \frac{\pi}{4} \right) + n \frac{\pi}{2} \right] = \\
 &= \sqrt{2} P_{z\max} \sin \left[ \omega \cdot \tau + (1 + 2n) \frac{\pi}{4} \right], \\
 t &= \tau + n \frac{\pi}{2}, 0 \leq \omega \cdot \tau \leq \frac{\pi}{2}.
 \end{aligned}$$

Пиковая суммарная мощность для этого случая равна

$$P_{z(\pi/2)\max} = \sqrt{2} P_{z\max}.$$

На рисунке 2 представлен график этой мощности.

**Сопоставление рассмотренных вариантов.** Нагрузка сортировальной вибрационной машины при штатных колебаниях рабочих органов (смещение фаз –  $\pi$ ) по существу является импульсной. Нагрузка машины со смещением фаз колебаний рабочих органов на  $\pi/2$  существенно равномернее. Пиковая суммарная мощность во втором варианте меньше в  $\sqrt{2}$  (это около тридцати процентов).

Для штатного варианта коэффициент неравномерности активной (тепловой) мощности определяется по известной формуле:

$$\delta_{\pi} = \frac{P_{z\pi\max} - P_{z\pi\min}}{P_{z\pi\text{mid}}} = \frac{P_{z\pi\max} - P_{z\pi\min}}{(P_{z\pi\max} + P_{z\pi\min})/2} = 2.$$

(Здесь  $P_{z\pi\min} = 0$ ).

Для второго варианта:

$$\begin{aligned}
 \delta_{\pi/2} &= \frac{P_{z(\pi/2)\max} - P_{z(\pi/2)\min}}{\left[ P_{z(\pi/2)\max} + P_{z(\pi/2)\min} \right] / 2} = \\
 &= \frac{\sqrt{2} - 1}{(\sqrt{2} + 1)/2} = \frac{(\sqrt{2} - 1)(\sqrt{2} - 1)}{(\sqrt{2} + 1)(\sqrt{2} - 1)/2} = 2(\sqrt{2} - 1)^2 \approx 0,343.
 \end{aligned}$$

Преимущество второго варианта следует из отношения

$$\frac{\delta_{\pi}}{\delta_{\pi/2}} = \frac{2}{0,343} \approx 5,8.$$

Строго говоря, среднее значение функции, представленной на рисунке 1, не является среднеарифметическим от ее экстремумов

$$P_{z\pi\text{mid}} \neq (P_{z\pi\max} + P_{z\pi\min}) / 2.$$

Поэтому неравномерность мощностей можно уточнить следующим образом.

$$P_{z\pi\text{mid}} = P_{z\pi\max} \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sin \varphi d\varphi = -P_{z\pi\max} \frac{1}{\pi} \cos \varphi \Big|_0^{\pi} = \frac{2}{\pi} P_{z\pi\max}.$$

$$\delta_{\pi} = \frac{\pi}{2}.$$

$$P_{z(\pi/2)\min} = \frac{P_{z\pi\max}}{2}.$$

$$\begin{aligned}
 P_{z(\pi/2)\text{mid}} &= \frac{P_{z\pi\max}}{2} + \frac{2}{\pi} \left[ P_{z(\pi/2)\max} - \frac{P_{z\pi\max}}{2} \right] = \\
 &= \frac{P_{z\pi\max}}{2} + \frac{2}{\pi} \left[ \frac{P_{z\pi\max}}{\sqrt{2}} - \frac{P_{z\pi\max}}{2} \right]
 \end{aligned}$$

$$P_{z\pi\max} \left( \frac{1}{2} + \frac{2}{\sqrt{2}\pi} - \frac{1}{\pi} \right) = P_{z\pi\max} \frac{\sqrt{2}\pi + 4 - 2\sqrt{2}}{2\sqrt{2}\pi}.$$

$$\delta_{\pi/2} = \frac{P_{z(\pi/2)\max} - P_{z(\pi/2)\min}}{P_{z(\pi/2)\text{mid}}} = \frac{\frac{P_{z\pi\max}}{\sqrt{2}} - \frac{P_{z\pi\max}}{2}}{P_{z\pi\max} \frac{\sqrt{2\pi+4-2\sqrt{2}}}{2\sqrt{2\pi}}} =$$

$$\frac{2-\sqrt{2}}{2\sqrt{2}} \frac{2\sqrt{2}\pi}{\sqrt{2\pi+4-2\sqrt{2}}} = \frac{\pi(2-\sqrt{2})}{\sqrt{2\pi+4-2\sqrt{2}}} \approx 0,328.$$

$$\frac{\delta_{\pi}}{\delta_{\pi/2}} = \frac{\pi}{2} \frac{1}{0,328} \approx 4,8.$$

Этот результат более точен.

Смещение фаз колебаний массивных рабочих органов вибрационных сортировальных машин на девяносто градусов [7, 8] помимо полной самонейтрализации непроизводительной реактивной механической мощности приводит к снижению в 4,8 раза неравномерности производительной (активной) мощности при сортировке сыпучих материалов [10] с одновременным уменьшением ее пикового значения почти на тридцать процентов.

Таким образом, за счет предлагаемого изменения конструкции сортировальной машины, возможно улучшить производительность при производстве сыпучих материалов с одновременным снижением их себестоимости.

### Литература

1. Езерский, В. А. Методика сравнительной оценки качества многокомпонентных цементных композиций с использованием техногенных отходов / В. А. Езерский, Н. В. Кузнецова, А. Д. Селезнев // Вестник Вологодского государственного университета. – 2018. – № 2 (2). – С. 57–62.
2. Бакаев, В. Н. Управляемый электропривод механизмов маятникового типа / В. Н. Бакаев // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 2 (4). С. 7–8.

3. Попов, И. П. Самобалансировка вибрационных механизмов / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2018. – № 2 (2). – С. 16–19.

4. Балансировка вибромашин при строительстве железнодорожного пути / И. П. Попов, Д. Н. Парышев, В. М. Самуйлов, К. А. Васильев // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. – 2018. № 2 (38). – С. 15–19.

5. Попов, И. П. Диссипативная, реактивная и полная мощности виброприводов машин / И. П. Попов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 3 (5). – С. 72–74.

6. Активная, реактивная и полная механические мощности решетного сепаратора / И. П. Попов, В. Ю. Левитский, С. С. Родионов, С. И. Родионова // Вестник Курганской ГСХА. – 2019. – № 2 (30). – С. 70–73.

7. Оптимизация мощности решетных зерноочистительных машин / И. П. Попов, В. Г. Чумаков, С. С. Родионов [и др.] // Достижения науки и техники АПК. – 2017. – Т. 31, № 5. – С. 53–56.

8. Диссипативная мощность при наклоне решет зерноочистительной машины / И. П. Попов, В. Г. Чумаков, С. С. Родионов [и др.] // Вестник Курганского государственного университета. Технические науки. – 2015. – № 3 (37), Вып. 10. – С. 35–36.

9. Определение влияния зернового вороха на динамику решетного стана / И. П. Попов, В. Г. Чумаков, В. И. Чарыков [и др.] // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2016. – № 4 (49). – С. 69–75.

10. Опыт внедрения системы бережливого производства на российских промышленных предприятиях / А. В. Колобов, В. В. Глухов, Е. М. Игумнов, Д. Н. Наумов // Вестник Вологодского государственного университета. – 2019. – № 3(5). – С. 58–63.

*I.P. Popov*

### PRODUCTION CAPACITY WHEN SORTING BULK MATERIALS

The article describes a method of reducing the unproductive power of vibrating sorting machines due to the shift of the oscillation phases. A methodology for assessing the influence of displacement of oscillation phases on the characteristics of changes in the power of the sorting machine is presented. The possibility of reducing the unevenness of productive (active) power when sorting bulk materials with a simultaneous decrease in its peak value by almost thirty percent has been proved.

Bulk material sorting, building materials, vibrations, phase, mixing, self-neutralization, reactive, active power.



## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛАООТДАЧИ ОСАДКА ПОСЛЕ ЗАМОРАЖИВАНИЯ

В статье отражена актуальность вопроса интенсификации обезвоживания осадка в очистных сооружениях водоотведения. Уточнены параметры, определяющие влагоотдачу уплотненного избыточного активного ила. Зафиксировано снижение удельного сопротивления фильтрации при трехкратном замораживании осадка сточных вод и улучшение динамики фильтрования осадка по отношению к осадку, не подвергавшемуся замораживанию. Подтверждено влияние замораживания осадка на увеличение его влагоотдачи.

Уплотненный избыточный активный ил, удельное сопротивление фильтрации осадка, замораживание, влагоотдача, влажность осадка.

Для гравитационного обезвоживания осадка, образующегося на станциях биологической очистки сточных вод малой производительности в условиях Северо-Западного региона, широко применяются иловые площадки с искусственным водонепроницаемым основанием и дренажем. Площадки используются с целью обезвоживания и подсушивания осадка. Особенностью эксплуатации таких сооружений является зависимость их от климатических факторов, которые изменяют физические свойства осадка и, соответственно, влияют на его влагоотдачу.

Из литературы известно [1–3], что замораживание приводит к изменению структуры осадка, способствует быстрому его обезвоживанию. Таким образом, замораживание может рассматриваться как процесс подготовки осадка к обезвоживанию на иловых площадках.

Изучение изменения физических свойств осадка после замораживания с последующим оттаиванием является предметом деятельности ряда авторов [4, 5]. Проведенные ими исследования показывают, что при замораживании осадка на иловых площадках в первую очередь кристаллизуется свободная влага, образуя поверхностный слой льда. Твердые частицы вытесняются из слоя кристаллизующейся жидкости в слой осадка, а молекулы воды ориентируются таким образом, чтобы обеспечивать дальнейшее образование кристаллов льда [6, 7]. Установлено также, что большей влагоотдачей обладает осадок, замороженный при небольших отрицательных температурах в условиях низких скоростей движения фронта формирующегося льда, так как при медленном процессе замораживания связанная влага успевает распространиться в межклеточное пространство, где она и кристаллизуется. Возникающее при этом внутреннее напряжение сжатия способствует укрупнению и коагуляции обезвоженных частиц осадка и накоплению слоя уплотняемого осадка на дне площадки, т.е. с противоположной стороны относительно поверхности теплообмена. В таких условиях замерзание твердых и коллоидных частиц происходит в последнюю очередь, и это обеспечивает максимальное образование свободной влаги при изменении структуры осадка.

В проанализированных источниках отмечено, что изменение структуры осадка при замораживании приводит к снижению его удельного сопротивления фильтрации, и, соответственно, к увеличению производительности иловых площадок и уменьшению показателя «взвешенные вещества» дренажной воды [1, 3, 8]. В то же время влияние многократно повторяемого замораживания и оттаивания осадка на изменение его физических свойств и влагоотдачи в литературе не отражено.

Целью проводимых автором данной статьи исследований является изучение влияния многократно повторяемого замораживания и оттаивания осадка уплотненного избыточного активного ила (УИАИ) на снижение удельного сопротивления фильтрации (УСФ), уменьшение времени уплотнения осадка и увеличение скорости гравитационного обезвоживания с применением фильтрующего материала.

Изначально была проведена серия опытов по определению концентрации, влажности, зольности и удельного сопротивления фильтрации исходного осадка УИАИ. Результаты исследования представлены в таблице 1.

В проведенных нами исследованиях [9, 10] был выявлен оптимальный диапазон температур замораживания осадка, который для УИАИ составил от минус 5 до минус 10 °С. Исходя из этого, опыты по трехкратному (циклическому) замораживанию осадка проводились в данном диапазоне температур.

Методика проведения исследования предполагала одновременное размещение шести проб осадка УИАИ объемом по 500 мл в морозильной камере при постоянной температуре. Каждый из трех циклов температурного воздействия включал в себя: 18-ти часовое замораживание и последующее размораживание в течение 6 часов при температуре +20 °С. После каждого цикла замораживания и оттаивания в пяти повторениях определялись по стандартным методикам следующие показатели: «удельное сопротивление фильтрации» осадка (R), «взвешенные вещества» осадка (ВВ), «влажность» осадка (Вл).

Результаты исследования исходного осадка УИАИ

Номер пробы	Показатель			
	Концентрация, мг/л	Влажность, %	Зольность, %	Удельное сопротивление фильтрации $R, \times 10^{-10}$ см/г
1	32150	96,2	30,6	230,2
2	32600	96,0	31,3	216,4
3	32730	96,4	30,5	196,7
4	32500	96,2	30,4	222,8
5	32350	96,3	30,6	212,2
6	30910	96,4	30,1	201,3
7	32470	96,0	31,2	193,9
8	32840	96,1	31,6	214,2
9	33730	96,7	31,4	203,5
10	30430	96,4	30,7	209,7
11	33270	96,5	30,9	197,5
12	31890	96,2	31,0	224,4

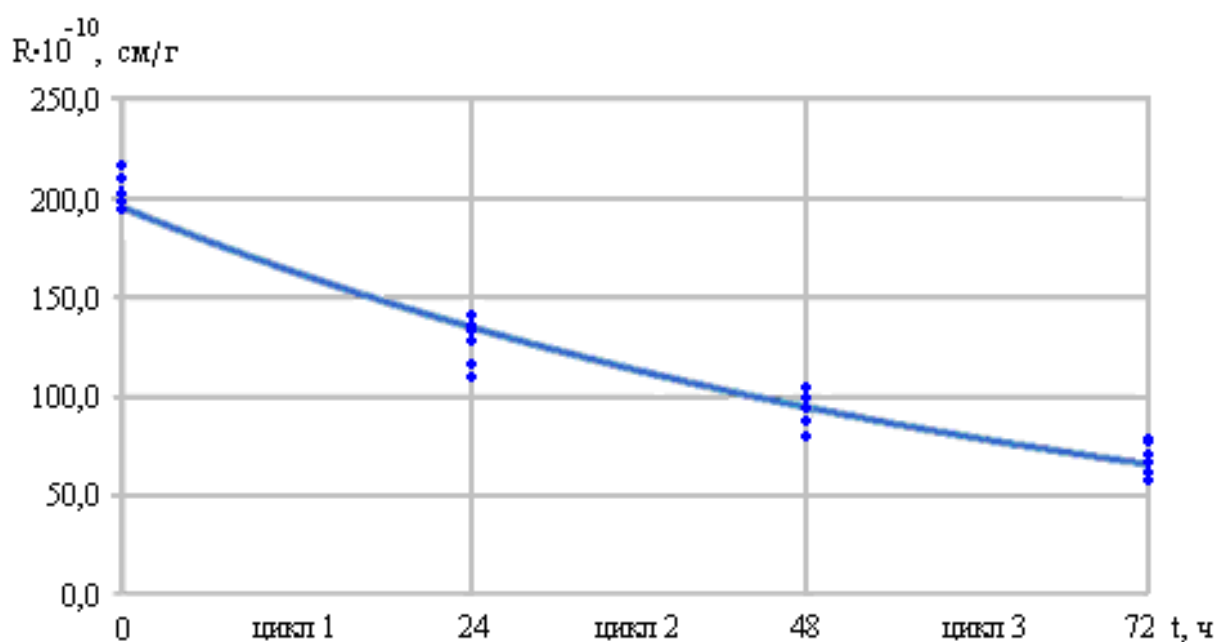


Рис. 1. Изменение удельного сопротивления фильтрации осадка УИАИ по циклам замораживания: 1-й цикл (0–24 ч); 2-й цикл (24–48 ч); 3-й цикл (48–72 ч)

Результаты исследования удельного сопротивления фильтрации осадка УИАИ после каждого из трех циклов замораживания представлены на рисунке 1.

Циклическое замораживание с последующим оттаиванием позволило снизить удельное сопротивление фильтрации осадка после первой фазы замораживания в 1,4 раза, после второй и третьей фаз – в 2,3 и 3,0 раза относительно начального значения. Полученный эффект подтверждает значительное изменение структуры осадка, способствующее повышению его влагоотдачи.

Исследование гравитационного уплотнения УИАИ, подвергнутого замораживанию, проводилось путем одновременного размещения шести проб в мерных цилиндрах объемом 1000 мл каждый и фиксации образующегося объема осадка на протяжении одного часа с интервалом десять минут.

Результаты исследования гравитационного уплотнения УИАИ представлены на рисунке 2.

Исследование гравитационного фильтрования УИАИ, подвергнутого замораживанию, проводилось путем пропускания шести проб объемом 100 мл через бумажные фильтры «белая лента» с измерением объема фильтрата через каждые десять минут.

Результаты исследования гравитационного фильтрования осадка УИАИ представлены на рисунке 3.

Полученные результаты исследования показывают, что увеличение числа циклов замораживания от одного до трех положительно влияет на гравитационное уплотнение и фильтрование осадка по отношению к пробам, не подвергавшимся температурному воздействию. Интенсивная влагоотдача зафиксирована на протяжении первых 20 минут фильтрования по всем пробам осадка (рис. 3). Дальнейшее фильтрование протекает в спокойной фазе, без значительного изменения скорости.

Исследованный осадок обезвоживается сложнее, чем просто избыточный активный ил, что согласуется с результатами исследований авторов [1, 11].

Среднее значение показателя «взвешенные вещества» исходного исследуемого осадка составляло 32,5 г/л и практически не менялось на протяжении

циклов замораживания, что зафиксировано в таблице 2. В то же время влажность осадка, полученная при первом цикле замораживания в значении 97,5%, после следующих двух циклов уменьшалась в среднем на 1%.

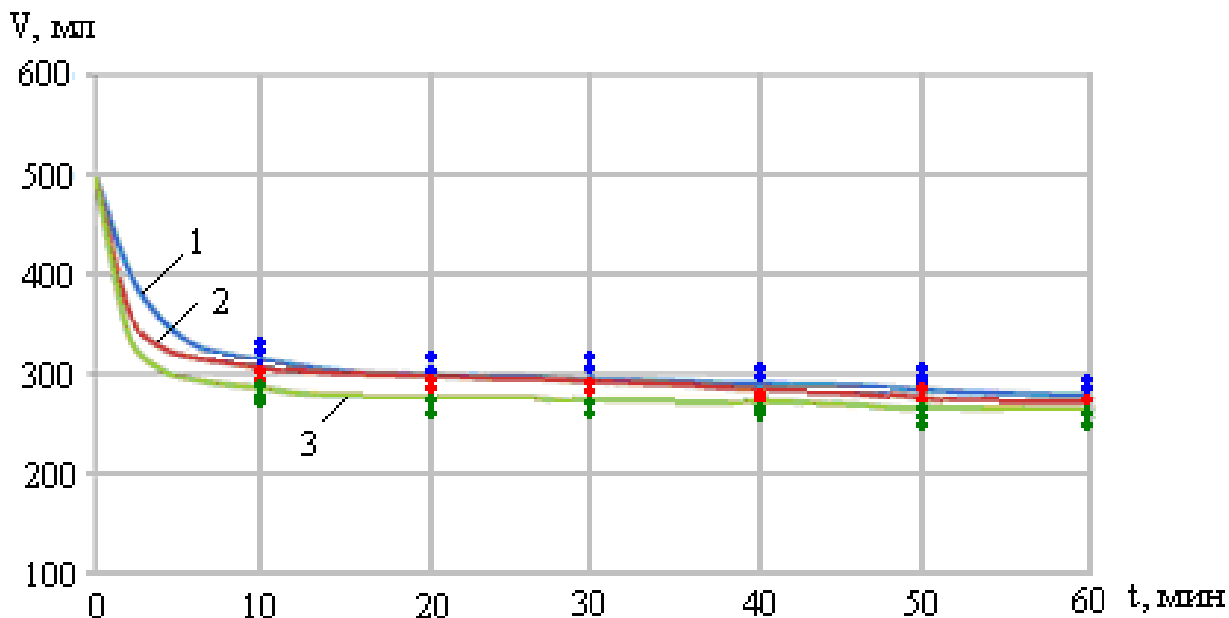


Рис. 2. Изменение объема УИАИ при гравитационном уплотнении осадка после трех циклов его замораживания:  
1 – 1-й цикл; 2 – 2-й цикл; 3 – 3-й цикл

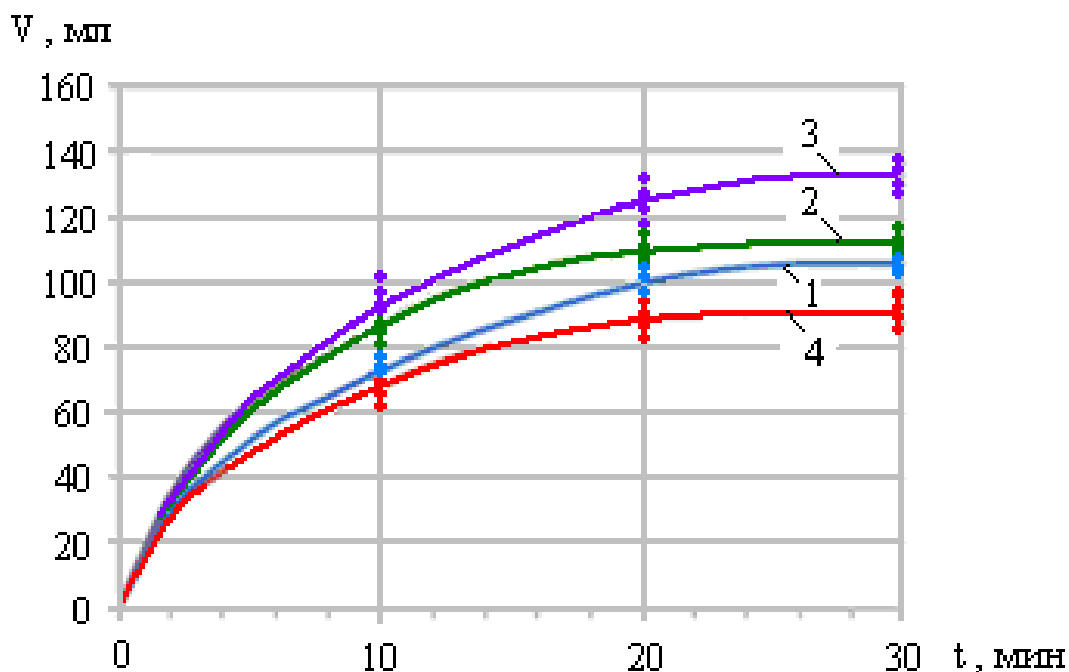


Рис. 3. Изменение объема фильтрата (V) в зависимости от продолжительности фильтрования осадка после трех циклов его замораживания:  
1 – 1-й цикл; 2 – 2-й цикл; 3 – 3-й цикл; 4 – исходный осадок

## Результаты исследования осадка УИАИ

№ опыта	Цикл замораживания								
	1-й цикл			2-й цикл			3-й цикл		
	$R \cdot 10^{-10}$ , см/г	ВВ, мг/л	Вл, %	$R \cdot 10^{-10}$ , см/г	ВВ, мг/л	Вл, %	$R \cdot 10^{-10}$ , см/г	ВВ, мг/л	Вл, %
1	110,9	31965	97,6	81,7	31880	97,0	58,4	30735	96,6
2	142,6	32315	97,4	100,4	32015	96,8	67,8	33210	96,3
3	140,3	33060	97,5	105,6	34270	96,4	75,9	32450	96,1
4	133,2	32565	97,3	98,5	32410	96,9	71,2	33515	96,3
5	115,8	32465	97,5	90,2	31640	97,0	61,2	32980	96,6
Mid	128,6	32474	97,5	95,3	32443	96,8	66,9	32578	96,4

Представленные результаты исследования подтверждают изменение свойств осадка УИАИ, что позволяет рассматривать применение многократного замораживания в условиях эксплуатации иловых площадок в зимний период времени года для интенсификации процесса обезвоживания. Технология обработки осадка на иловых площадках в зимний период времени в этом случае будет предусматривать разлив осадка, его гравитационное уплотнение, слив верхнего слоя осветленной влаги, замораживание всего слоя осадка, удаление выделившейся свободной влаги фильтрованием через слой загрузки после полного размораживания осадка.

На основании проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Повторное замораживание осадка с последующим оттаиванием снижало удельное сопротивление фильтрации УИАИ в 3,0 раза.

2. Влажность УИАИ после трехкратного замораживания снижалась в среднем на 2%.

3. После трех циклов замораживания с оттаиванием улучшалось уплотнение осадка. Наибольшая динамика зафиксирована в течение первых 10 минут уплотнения. Осадок УИАИ уменьшался в объеме относительно исходного значения в 2 раза.

4. Наибольшая эффективность гравитационного фильтрования через слой бумажного фильтра «белая лента» для УИАИ наблюдалась на протяжении первых 20 минут. Скорость фильтрования УИАИ улучшилась в 1,4 раза по отношению к осадку, не подвергнутому замораживанию.

Таким образом, многократно повторяемое замораживание осадка уплотненного избыточного активного ила (УИАИ) влияет на снижение удельного сопротивления фильтрации (УСФ), уменьшение времени уплотнения осадка и увеличение скорости гравитационного обезвоживания с применением фильтрующего материала.

## Литература

1. Зайнуллин, Р. Р. Применение процессов замораживания и оттаивания осадков сточных вод / Р. Р. Зайнуллин, А. А. Галяутдинов // Инновационная наука. – 2016. – № 6. – С. 72–74.

2. Мисбахов, Р. Ш. Ячеистая модель фазового перехода в сферической капле при охлаждении / Р. Ш. Мисбахов, В. Е. Мизонов // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2015. – № 8. – С. 71–74.

3. Веригина, Е. Л. Изучение изменения свойств осадков городских сточных вод на площадках естественной сушки / Е. Л. Веригина // Известия МГТУ МАМИ. – 2014. – № 1 (19). – С. 91–98.

4. Авторское свидетельство № 1046201 СССР, МПК<sup>4</sup> С 02 F 11/20. Способ обезвоживания осадка сточных вод : № 3272127 : заявл. 03.04.1981: опубл. 07.10.1983 / Соковнин В. М., Дрожнер В. М., Кузнецова И. В. [и др.]; заявитель : Государственный проектный институт «Укрводоканалпроект».

5. Патент № 2393122 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> С 02 F 11/14. Способ круглогодичного обезвоживания осадков муниципальных сточных вод на иловых площадках : № 2008146565 : заявл. 25.11.2008 : опубл. 27.06.2010, бюл. № 18 / Иванов Н. А., Иванов А. Н. ; заявители и патентообладатели Иванов Николай Александрович, Иванов Антон Николаевич.

6. Хисамеева, Л. Р. Обработка осадков городских сточных вод : учебное пособие / Л. Р. Хисамеева, А. С. Селюгин. – Казань : Издательство Казанского государственного архитектурно-строительного университета, 2016. – 105 с.

7. Благоразумова, А. М. Обработка и обезвоживание осадков городских сточных вод : учебное пособие / А. М. Благоразумова. – Новокузнецк : Сиб-ГИУ, 2010. – Ч. 1. – 139 с.

8. Туровский, И. С. Обработка осадков сточных вод / И. С. Туровский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Стройиздат, 1982. – 223 с.

9. Тянин, А. Н. Влияние замораживания на повышение влагоотдачи осадков сточных вод / А. Н. Тянин, Н. А. Кузнецов // Теоретические и прикладные вопросы науки и образования : сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции (Тамбов, 30.04.2019 г.) / Тамбов : Консалтинговая компания Юком, 2019. – Ч. 1. – С. 110–112.

10. Тянин, А. Н. Исследование влагоотдачи избыточного активного ила после замораживания и оттаивания / А. Н. Тянин // Актуальные направления фун-

даментальных и прикладных исследований : материалы XIX международной научно-практической конференции. NorthCharleston, 21-22.05.2019. – Morrisville, NC, USA : LuluPress, 2019. – P. 97–99.

11. Пугачев, Е. А. Процессы и аппараты обработки осадков сточных вод : монография / Е. А. Пугачев. – Москва : Издательство АСВ, 2012. – 208 с.

*A.N. Tyanin*

#### **RESEARCH OF SEDIMENT MOISTURE-YIELDING ABILITY AFTER FREEZING**

The article shows the relevance of the issue of intensification of sediment dewatering in wastewater treatment plants. The parameters determining the moisture-yielding ability of thickened excess active sludge are specified. A decrease in the specific filtration resistance during threefold freezing of sewage sediment, the improvement in the dynamics of sediment filtration in relation to the sediment which is not subjected to freezing, was recorded. The effect of sediment freezing on increasing its moisture-yielding ability was confirmed.

Thickened excess active sediment, specific resistance to sediment filtration, freezing, moisture-yielding ability, sediment moisture.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

### **Аваев Александр Алексеевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Череповецкого государственного университета (Череповец, Россия)  
chsu@chsu.ru

### **Бакаев Владимир Николаевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры управляющих и вычислительных систем Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
bvn46@mail.ru

### **Белюсова Виктория Павловна**

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
belousova.v2011@mail.ru

### **Бобков Николай Львович**

генеральный директор ООО НПК «АкваПротех» (Краснодар, Россия)  
bobkov.arktika@mail.ru

### **Бормосов Николай Александрович**

кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
bormosovna@vogu35.ru

### **Булат Анатолий Дмитриевич**

кандидат технических наук, доцент, главный конструктор ООО НПК «АкваПротех» (Краснодар, Россия)  
bulat19542bulat@yandex.ru

### **Втулкин Александр Андреевич**

обучающийся инженерно-строительного института Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
bormosovna@vogu35.ru

### **Дианов Сергей Владимирович**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник Вологодского научного центра Российской академии наук (Вологда, Россия)  
dianov.sv@mail.ru

### **Колпаков Валерий Николаевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
valery.kolpakov-vn2016@yandex.ru

### **Кудряшов Дмитрий Алексеевич**

обучающийся института математики, естественных и компьютерных наук Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
loikker@yandex.ru

**Кузнецов Дмитрий Васильевич**

обучающийся инженерно-технического института Череповецкого государственного университета (Череповец, Россия)  
kuznetcovdimitri@gmail.com

**Куницкий Вячеслав Андреевич**

обучающийся инженерно-строительного института Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
globe@mail.ru

**Курилова Наталия Владимировна**

старший преподаватель кафедры автомобилей и автомобильного хозяйства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
natalivzo@mail.ru

**Литовченко Олег Владимирович**

технический директор ООО НПК «АкваПротех» (Краснодар, Россия)  
oleg.lit@mail.ru

**Лукин Кирилл Сергеевич**

обучающийся инженерно-строительного института Вологодского государственного университета и Института безопасности жизнедеятельности Университета ГПС МЧС России (Вологда, Россия)  
kirilllukinrus@gmail.com

**Михалевич Надежда Вениаминовна**

кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
nadmix1958@yandex.ru

**Никитин Леонид Алексеевич**

кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Вологодского научного центра Российской академии наук (Вологда, Россия)  
sznii@list.ru

**Никифоров Владислав Евгеньевич**

старший преподаватель кафедры электрооборудования Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
eo@vogu35.ru

**Обрубов Владимир Александрович**

кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по науке Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Тольяттинский филиал (Тольятти, Россия)  
obrubov@mail.ru

**Огородов Леонид Иванович**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры гидравлики и прочности Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (Санкт-Петербург, Россия)  
l.ogorodov@mail.ru

**Поварова Ольга Александровна**

старший преподаватель кафедры строительства инженерно-технического института Череповецкого государственного университета (Череповец, Россия)  
boliaa@mail.ru

**Попов Игорь Павлович**

старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, металлорежущих станков и инструментов Курганского государственного университета (Курган, Россия)  
ip.popow@yandex.ru

**Сорокин Арсений Николаевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматики и вычислительной техники Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
arseny\_sorokin@mail.ru

**Стариков Леонид Константинович**

обучающийся института математики, естественных и компьютерных наук Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
slk996@mail.ru

**Суконщиков Алексей Александрович**

кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой автоматики и вычислительной техники Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
avt@vogu35.ru

**Тянин Александр Николаевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоводоснабжения Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
tyanin54@mail.ru

**Филенков Владимир Михайлович**

кандидат технических наук, доцент Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации, Тольяттинский филиал (Тольятти, Россия)  
polkovnik-feliks@mail.ru

**Шапкина Вероника Андреевна**

кандидат педагогических наук, доцент кафедры автомобильных дорог Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
vtnk@bk.ru

**Шахова Елена Николаевна**

старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
shen1401@mail.ru

**Швецов Анатолий Николаевич**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информатики и информационных технологий Вологодского государственного университета (Вологда, Россия)  
smithv@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### **Avaev Aleksandr Alekseevich**

Candidate of Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Advanced Mathematics of Cherepovets State University (Cherepovets, Russia)  
chsu@chsu.ru

### **Bakaev Vladimir Nikolayevich**

Candidate of Engineering, Associate Professor of the Department of Control and Computer Systems of Vologda State University (Vologda, Russia)  
bvn46@mail.ru

### **Belousova Viktoriya Pavlovna**

Candidate of Engineering, Associate Professor of the Department of Machine Building of Vologda State University (Vologda, Russia)  
belousova.v2011@mail.ru

### **Bobkov Nikolay Lvovich**

Director General of AquaProtech LLC NPK (Krasnodar, Russia)  
bobkov.arktika@mail.ru

### **Bormosov Nikolay Aleksandrovich**

Candidate of Engineering, Associate Professor of the Department of Automobiles and Automobile Industry of Vologda State University (Vologda, Russia)  
bormosovna@vogu35.ru

### **Bulat Anatoly Dmitrievich**

Candidate of Engineering, Associate Professor, the chief constructor of AquaProtech LLC NPK (Krasnodar, Russia)  
bulat19542bulat@yandex.ru

### **Vtulkin Aleksandr Andreevich**

Student of Civil Engineering Institute of Vologda State University (Vologda, Russia)  
bormosovna@vogu35.ru

### **Dianov Sergey Vladimirovich**

Candidate of Engineering, senior research associate of Vologda Scientific Centre of the Russian Academy of Science (Vologda, Russia)  
dianov.sv@mail.ru

### **Kolpakov Valery Nikolaevich**

Candidate of Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Machine Building of Vologda State University (Vologda, Russia)  
valery.kolpakov-vn2016@yandex.ru

### **Kudryashov Dmitry Alekseevich**

Student of the Institute of Mathematics, Natural and Computer Sciences of Vologda State University (Vologda, Russia)  
loikker@yandex.ru

### **Kuznetsov Dmitry Vasilyevich**

Student of Engineering and Technical Institute of Cherepovets State University (Cherepovets, Russia)  
kuznetcovdimitri@gmail.com

### **Kunitsky Vyacheslav Andreevich**

Student of Civil Engineering Institute of Vologda State University (Vologda, Russia)  
globee@mail.ru

**Kurilova Natalya Vladimirovna**

Senior lecturer of the Department of Automobiles and Automobile Industry of Vologda State University (Vologda, Russia)  
natalivzo@mail.ru

**Litovchenko Oleg Vladimirovich**

Technical Director of AquaProtech LLC NPK (Krasnodar, Russia)  
Oleg.lit@mail.ru

**Lukin Kirill Sergeevich**

Student of Civil Engineering Institute of Vologda State University and University of State Fire Service of Emercom of Russia (Vologda, Russia)  
kirilllukinrus@gmail.com

**Mikhalevich Nadezhda Veniaminovna**

Candidate of Engineering, Associate Professor, Leading researcher of Vologda Research Centre of the Russian Academy of Science (Vologda, Russia)  
Nadmix1958@yandex.ru

**Nikitin Leonid Alekseevich**

Candidate of Engineering, Associate Professor, Leading researcher of Vologda Research Centre of the Russian Academy of Science (Vologda, Russia)  
sznii@list.ru

**Nikiforov Vladislav Evgenyevich**

Senior lecturer of the Department of Electrical Equipment of Vologda State University (Vologda, Russia)  
eo@vogu35.ru

**Obrubov Vladimir Aleksandrovich**

Candidate of Engineering, Associate Professor, Science Director Deputy of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (Togliatti, Russia)  
obrubov@mail.ru

**Ogorodov Leonid Ivanovich**

Candidate of Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Hydrolics and Strength of Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Russia)  
l.ogorodov@mail.ru

**Povarova Olga Aleksandrovna**

Senior lecturer of the Department of Construction of Cherepovets State University (Cherepovets, Russia)  
boliaa@mail.ru

**Popov Igor Pavlovich**

Senior lecturer of the Department of Machine Building Technology, Metalcutting Machines and Tools of Kurgan State University (Kurgan, Russia)  
ip.popow@yandex.ru

**Sorokin Arseniy Nikolayevich**

Candidate of Engineering, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation and Computing Technology of Vologda State University (Vologda, Russia)  
arseny\_sorokin@mail.ru

**Starikov Leonid Konstantinovich**

Student of the Institute of Mathematics, Natural and Computer Sciences of Vologda State University (Vologda, Russia)  
slk996@mail.ru

**Sukonschikov Aleksey Aleksandrovich**

Candidate of Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Automation and Computing Technology of Vologda State University (Vologda, Russia)  
avt@vogu35.ru

**Tyanin Aleksandr Nikolayevich**

Candidate of Engineering, Associate Professor of the Department of Heat, Gas and Water Supply of Vologda State University (Vologda, Russia)  
tyanin54@mail.ru

**Filenkov Vladimir Mikhailovich**

Candidate of Engineering, Associate Professor, Science Director Deputy of the Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration (Togliatti, Russia)  
polkovnik-feliks@mail.ru

**Shapkina Veronika Andreevna**

Candidate of Pedagogics, Associate Professor of the Department of Automobile Roads of Vologda State University, (Vologda, Russia)  
vrnk@bk.ru

**Shakhova Elena Nikolayevna**

Senior lecturer of the Department of Industrial and Civil Engineering of Vologda State University (Vologda, Russia)  
shen1401@mail.ru

**Shvetsov Anatoliy Nikolayevich**

Doctor of Engineering, Professor, Professor of the Department of Information Technology and Information Technology of Vologda State University (Vologda, Russia)  
smithv@mail.ru

*Научное издание*

ВЕСТНИК ВОЛОГОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия: Технические науки  
№ 1 (7) / 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 27.04.2020. Выпуск в свет .04.2020. Формат 60 × 84/8  
Уч.-изд. л. 8,12. Усл. печ. л. 10,5. Тираж 67 экз. Заказ № . Бесплатно

---

ФГБОУ ВО «Вологодский государственный университет»  
160000, Вологодская область, город Вологда, улица Ленина, дом 15

Отпечатано: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Вологодский научный центр Российской академии наук»  
(ФГБУН ВолНЦ РАН)  
160014, г. Вологда, ул. Горького, 56а  
Тел.: 59-78-03, e-mail: common@vscc.ac.ru