

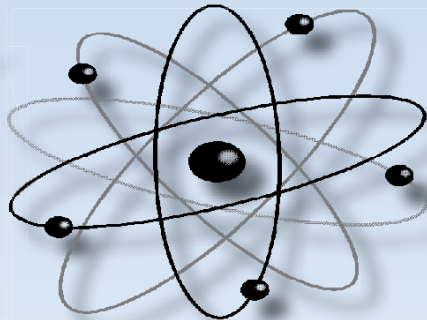
ISSN 2076-4359

# Учёные записки

№ VII (55)

2021

Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета



Науки о природе и технике

16+



Рукописи проходят обязательное рецензирование.  
Редакция не возвращает рукописи авторам.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых периодических изданий ВАК РФ

Зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций России. Свидетельство ПИ № ФС7738212 от 30.11.2009.

ISSN 2076-4359 = Učenyje zapiski Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta

Уважаемые авторы, пожалуйста, присылайте свои материалы на адрес электронной почты: [journal@knastu.ru](mailto:journal@knastu.ru)

Правила оформления материалов размещены на странице журнала «Учёные записки КНАГУ», находящейся на сайте <http://www.knastu.ru>

Материалы, оформленные с нарушением данных правил, к рассмотрению не принимаются.

Адрес учредителя и издателя:  
681013, г. Комсомольск-на-Амуре,  
пр. Ленина, д. 27  
Телефон для справок:  
+7 (4217) 24-13-48

Адрес редакции: 681013,  
г. Комсомольск-на-Амуре,  
ул. Комсомольская, д. 50, ауд.508  
Телефон для справок:  
+7 (4217) 24-13-48  
Индекс журнала  
в каталоге Роспечать: 66090.  
Цена свободная.  
© Все права на опубликованные материалы принадлежат учредителю журнала – ФГБОУ ВО «КНАГУ», при их цитировании ссылка на журнал обязательна.

**Учредитель:**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»**

Журнал основан в 2010 году

#### **Редакционная коллегия:**

Главный редактор журнала:	<b>Алексей Иванович Евстигнеев</b> , д-р техн. наук, проф.
Заместитель главного редактора, ответственный секретарь серии «Науки о природе и технике»:	<b>Сергей Николаевич Иванов</b> , д-р техн. наук, доц.
Заместитель главного редактора, ответственный секретарь серии «Науки о человеке, обществе и культуре»:	<b>Галина Алексеевна Шушарина</b> , канд. филол. наук, доц.
Технический редактор:	<b>Татьяна Николаевна Карпова</b>
Дизайн и верстка:	<b>Оксана Вадимовна Приходченко</b> , канд. техн. наук
Менеджер информационных ресурсов:	<b>Иван Константинович Андрианов</b> , канд. техн. наук

#### **Серия: «Науки о природе и технике»**

Отделы:

1. Авиационная и ракетно-космическая техника (**Сергей Иванович Феоктистов**, д-р техн. наук, проф.);
2. Энергетика (**Вячеслав Алексеевич Соловьев**, д-р техн. наук, проф.);
3. Управление, вычислительная техника и информатика (**Вячеслав Алексеевич Соловьев**, д-р техн. наук, проф., **Сергей Иванович Феоктистов**, д-р техн. наук, проф., **Сергей Николаевич Иванов**, д-р техн. наук, доц., **Николай Алексеевич Тарануха**, д-р техн. наук, проф., **Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
4. Математика и механика (**Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
5. Машиностроение (**Михаил Юрьевич Сариллов**, д-р техн. наук, доц., **Борис Николаевич Марьин**, д-р техн. наук, проф., **Борис Яковлевич Мокрицкий**, д-р техн. наук, доц., **Сергей Иванович Феоктистов**, д-р техн. наук, проф., **Анатолий Александрович Буренин**, д-р физ.-мат. наук, член-корреспондент РАН);
6. Металлургия и металловедение (**Владимир Алексеевич Ким**, д-р техн. наук, проф., **Олег Викторович Башков**, д-р техн. наук, доц.);
7. Флот и кораблестроение (**Николай Алексеевич Тарануха**, д-р техн. наук, проф., **Виктор Михалович Козин**, д-р техн. наук, проф.);
8. Науки о земле и безопасности жизнедеятельности человека (**Ирина Павловна Степанова**, д-р техн. наук, проф.);
9. Строительство и архитектура (**Николай Петрович Крадин**, д-р архитектуры, проф., член-корреспондент РААСН, **Олег Евгеньевич Сысоев**, д-р техн. наук, доц.).

#### **Серия: «Науки о человеке, обществе и культуре»**

Отделы:

1. Философия, социология и культурология (**Татьяна Алексеевна Чабанюк**, д-р культурологии, проф., **Виктория Юрьевна Прокофьева**, д-р филол. наук, проф., **Вера Ивановна Юдина**, д-р культурологии, доц., **Надежда Юрьевна Костюрина**, д-р культурологии, доц., **Илья Игоревич Докучаев**, д-р филос. наук, проф., **Александр Георгиевич Никитин**, д-р филос. наук, проф.);
2. Филология и искусствознание (**Олег Александрович Бузуев**, д-р филос. наук, проф.);
3. Психология и педагогика (**Татьяна Евгеньевна Наливайко**, д-р пед. наук, проф.);
4. Политология и право (**Владимир Александрович Смоляков**, д-р полит. наук);
5. История (**Жанна Валерьяновна Петрунина**, д-р ист. наук, проф.);
6. Экономика (**Геннадий Иванович Усанов**, д-р экон. наук, проф., **Елена Витальевна Кизиль**, д-р экон. наук, доц.).

Периодичность: два раза в квартал (один номер каждой серии в квартал)



## **МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА**

### **«УЧЁНЫЕ ЗАПИСКИ КОМСОМОЛЬСКОГО-НА-АМУРЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА»**

#### **СЕРИЯ: «НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ»**

##### **АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА**

ВЯЧЕСЛАВ ИВАНОВИЧ ШПОРТ, доктор технических наук

ЦУЙ СЮЙ, профессор Шеньянского аэрокосмического университета (КНР)

##### **ЭНЕРГЕТИКА**

АЛЕКСАНДР ЛООС, доктор философии, профессор Академии Грюндига в Нюрнберге (Германия)

ИШТВАН ВАЙДА, доктор технических наук, профессор, директор Института автоматизации Будапештского университета технологии и экономики (Венгрия)

ШАНДОР ХАЛАС, доктор технических наук, профессор Будапештского университета технологии и экономики (Венгрия)

##### **УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА**

ЮРИЙ НИКОЛАЕВИЧ КУЛЬНИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, директор Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН

ТАКАО ИТО, доктор технических наук, профессор факультета бизнес-управления Университета Мияки (Япония)

##### **МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА**

НИКИТА ФЁДОРОВИЧ МОРОЗОВ, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теории упругости Санкт-Петербургского государственного университета

ВЛАДИМИР АЛЕКСЕЕВИЧ ЛЕВИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом математического моделирования, механики и мониторинга природных процессов Института автоматизации и процессов управления ДВО РАН

БОРИС ДМИТРИЕВИЧ АННИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом механики деформируемого твёрдого тела Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН

##### **МАШИНОСТРОЕНИЕ**

ЭДУАРД СТЕПАНОВИЧ ГОРКУНОВ, академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Института машиноведения УрО РАН

АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ ХОЛЬКИН, академик РАН, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник Института общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова

СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ ГРИГОРЬЕВ, доктор технических наук, профессор, ректор Московского государственного технологического университета «Станкин»

##### **МЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ**

ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ КАБЛОВ, академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Всероссийского института авиационных материалов

КОНСТАНТИН ВСЕВОЛОДОВИЧ ГРИГОРОВИЧ, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией диагностики материалов Института металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН

##### **ФЛОТ И КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ**

ЛЕОНИД АНАТОЛЬЕВИЧ НАУМОВ, член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, директор Института проблем морских технологий ДВО РАН

##### **НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

ЕВГЕНИЙ ПЕТРОВИЧ КИСЕЛЕВ, академик РАСХН, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, ведущий научный сотрудник Дальневосточного ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательского института сельского хозяйства РАСХН

##### **СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

ШИ ТИЕМАО, доктор философии, профессор, проректор Шеньянского архитектурно-строительного университета (КНР)

#### **СЕРИЯ: «НАУКИ О ЧЕЛОВЕКЕ, ОБЩЕСТВЕ И КУЛЬТУРЕ»**

##### **ФИЛОСОФИЯ, СОЦИОЛОГИЯ И КУЛЬТУРОЛОГИЯ**

ДАВИД ИЗРАИЛЕВИЧ ДУБРОВСКИЙ, доктор философских наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института философии РАН

КИРИЛЛ ЭМИЛЬЕВИЧ РАЗЛОГОВ, доктор искусствоведения, профессор, президент АНО «Новый институт культурологии»

##### **ФИЛОЛОГИЯ И ИСКУССТВОВЕДЕНИЕ**

СВЕТЛАНА ГРИГОРЬЕВНА ТЕР-МИНАСОВА, доктор филологических наук, профессор, президент факультета иностранных языков и регионоведения Московского государственного университета

ВАН ЦЗИНЬЛИН, доктор философии, профессор, директор Института международного образования Чанчуньского университета (КНР)

##### **ПСИХОЛОГИЯ И ПЕДАГОГИКА**

ЕКАТЕРИНА ИОСИФОВНА АРТАМОНОВА, доктор педагогических наук, профессор кафедры педагогики высшей школы Московского педагогического государственного университета им. В. И. Ленина

##### **ПОЛИТОЛОГИЯ И ПРАВО**

НИКОЛАЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ МЕРЕЦКИЙ, доктор юридических наук, профессор, заведующий кафедрой уголовно-правовых дисциплин Дальневосточного государственного университета путей сообщения

##### **ИСТОРИЯ**

АЛЕКСАНДР МАНУЭЛЬЕВИЧ РОДРИГЕС-ФЕРНАНДЕС, доктор исторических наук, профессор, заведующий кафедрой новой и новейшей истории Московского педагогического государственного университета им. В. И. Ленина

##### **ЭКОНОМИКА**

АЛЕКСАНДР ЕВСТРАТЬЕВИЧ ЗУБАРЕВ, доктор экономических наук, профессор, первый проректор по стратегическому развитию и международному сотрудничеству Тихоокеанского государственного университета

**Ким К. И., Ким К. К., Иванов С. Н.**  
**K. I. Kim, K. K. Kim, S. N. Ivanov**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОВ, ИНДУЦИРОВАННЫХ В ЖИДКОСТИ С ТЕНЗОРНОЙ  
ПРОВОДИМОСТЬЮ БЕГУЩИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

**INVESTIGATION OF THE CURRENTS INDUCED IN A FLUID WITH TENSOR  
CONDUCTIVITY BY A RUNNING MAGNETIC FIELD**

**Ким Константин Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9, тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Konstantin I. Kim** – Dr. Sc., Professor, Theoretical Electrical Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av., Sankt-Petersburg, Russia; tel. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Ким Константин Константинович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и теплоэнергетики Петербургского государственного университета путей сообщения (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, Московский пр., д. 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Konstantin K. Kim** – Dr. Sc., Professor, Trinity College, Cambridge University, Great Britain, Professor, Dr.habil.ing.; Member of IEEE, NYAS, EANS Head of Theoretical Electrical Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av., Sankt-Petersburg, Russia; tel. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Иванов Сергей Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

**Sergey N. Ivanov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Electrical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

**Аннотация.** На основе уравнения движения электронного компонента и полученного ранее решения краевой задачи о распределении электромагнитного поля в анизотропно электропроводящей жидкости, текущей в бегущем магнитном поле по каналу прямоугольного сечения конечной ширины либо по каналу коаксиальной конфигурации, проанализирован характер холловских явлений. С помощью численных оценок показана относительная роль токов нулевой и двойной частоты, обуславливающих отличие распределения токов в жидкости от обычного, имеющего место при отсутствии анизотропии проводимости. В плоском канале токи двойной частоты могут отсутствовать при наличии идеально проводящих боковых стенок; в этом случае ток нулевой частоты, протекающий вдоль канала, достигает некоторого предельного значения, а токи основной частоты меньше, чем при изотропной проводимости. В канале коаксиальной конфигурации холловский ток отсутствует, но вдоль канала действует продольная ЭДС Холла.

**Summary.** We analyze the nature of the Hall phenomena with using the equation of motion of the electronic component and the previously obtained solution of the boundary problem of the electromagnetic field distribution in an anisotropically electrically conducting fluid flowing through a channel of a rectangular cross-section of finite width or through a channel of a coaxial configuration under action of the running magnetic field. We show the relative role of zero and double frequency currents with the help of numerical estimates. These currents are the cause of the difference in the distribution of currents in a fluid from the usual one which occurs in the absence of anisotropy of conductivity. In a flat channel double-frequency currents may be absent in the presence of perfectly conducting side walls. In this case the zero-frequency current flowing along the channel reaches a certain limit value and the main frequency currents are less than at isotropic conductivity. There is no Hall current in the channel of the coaxial configuration but a longitudinal Hall EMF acts along the channel



**Ключевые слова:** анизотропно электропроводящая жидкость, бегущее магнитное поле, канал, ток нулевой частоты, ток двойной частоты, эффект Холла.

**Key words:** anisotropically conducting fluid, running magnetic field, channel, zero frequency current, double frequency current, Hall effect.

УДК 538.3:538.4

**Введение.** Особенности электромагнитных процессов в жидкости с тензорной проводимостью в бегущем магнитном поле были рассмотрены в [1]. В этой работе на основе рассмотрения движения жидкости по каналу прямоугольного сечения с непроводящими боковыми стенками были установлены основные факты, связанные с тензорным характером проводимости, в случае бегущего магнитного поля. Было показано, что в жидкости, кроме токов основной частоты, соответствующей частоте внешнего магнитного поля, индуктируются токи нулевой и кратных частот, нарушающие обычный для изотропной среды характер протекания электромагнитных процессов. Ниже приводятся некоторые дополнительные соображения.

**Исследование токов, индуцированных в жидкости.** Уравнение импульсов для электронной компоненты электропроводящей жидкости имеет вид

$$nm \frac{d\mathbf{v}_e}{dt} = -ne\mathbf{E} - ne[\mathbf{v}_e \mathbf{B}] - \nabla p_e - nm[v_{ea}(\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_a) + v_{ei}(\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_i)], \quad (1)$$

где  $n$  – концентрация электронов;  $m$  и  $e$  – масса и заряд электрона;  $\mathbf{v}_e$ ,  $\mathbf{v}_i$  и  $\mathbf{v}_a$  – направленные скорости электронов, ионов и атомов соответственно;  $v_{ea}$  и  $v_{ei}$  – усреднённые частоты столкновений между соответствующими частицами;  $p_e$  – давление электронного газа,  $p_e = nkT_e$ , здесь  $k$  – постоянная Больцмана;  $T_e$  – электронная температура [3–5].

Если не учитывать время релаксации электронов ( $d\mathbf{v}_e/dt = 0$ ) и ввести обозначения  $\mathbf{v}_e - \mathbf{v}_a = \mathbf{v}_{ea}$ ,  $v_{ea} + v_{ei} = v_e$ , можно получить для пространственных компонент скорости ( $x$  – продольная ось канала,  $y$  – его поперечная ось) следующие соотношения:

$$v_{eax} = -b_e \frac{E_x - \omega_e \tau_e (E_y - u_1 B_z)}{1 + (\omega_e \tau_e)^2}, \quad v_{eay} = -b_e \frac{E_y - u_1 B_z + \omega_e \tau_e E_x}{1 + (\omega_e \tau_e)^2},$$

где  $b_e = m/v_e$  – подвижность электронов;  $\omega_e = eB_z/m$  – циклотронная частота электронов;  $B_z$  – вертикальная компонента индукции;  $\tau_e$  – время релаксации,  $\tau_e = v_e^{-1}$ ;  $u_1$  – скорость движения жидкости (т.е. атомов,  $\mathbf{v}_1 = \mathbf{v}_a = \mathbf{e}_x u_1$ ).

По приведённым формулам и информации на рис. 1 и рис. 2 можно определить поле направленных скоростей электронов в плоскости  $xu$  и по нему – контуры индуцированных токов ( $\mathbf{j} = -ne \mathbf{v}_{ea}$ ).

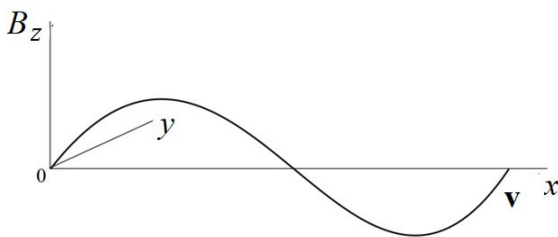


Рис. 1. Распределение вертикальной компоненты индукции по длине канала

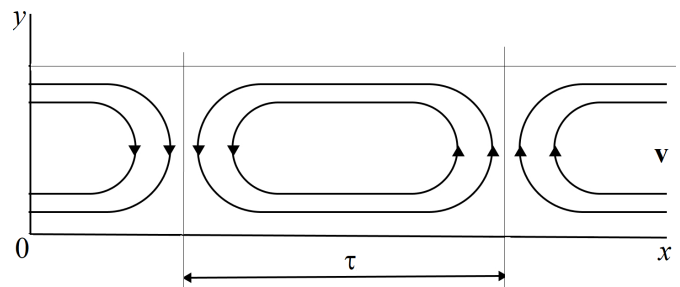


Рис. 2. Контуры токов основной частоты

Прежде всего зафиксируем линии равных скоростей, совпадающих с контурами токов основной частоты (см. рис. 2). Далее в соответствии с рис. 1 и рис. 2 можно видеть, что поперечный дрейф электронов, обусловленный лоренцевой силой  $j_x B_z$ , на участке канала длиной  $2\tau$  четыре раза изменит своё направление, разбивая этот участок на четыре области. В каждой из этих областей скорости электронов, находящихся по одну и другую сторону от оси канала ( $y = d^0/2$ , где  $d^0$  – ширина канала), будут направлены встречно. Лоренцева сила  $j_y B_z$  индуцирует периодически распределённую вдоль оси  $x$  продольную скорость, направленную против движения жидкости. Таким образом, кроме уже указанных линий равных скоростей, соответствующих рис. 2, можно выделить, по крайней мере, ещё два типа линий: линии, проходящие вдоль всего канала, замыкающиеся через его концевые зоны, и линии, целиком укладывающиеся на участке канала длиной  $\tau/2$ . Поэтому вместе с токами основной частоты с распределением согласно рис. 2 будут существовать токи двойной (см. рис. 3) и нулевой частот (см. рис. 4). Для численной оценки этих токов необходимо решить краевую задачу.

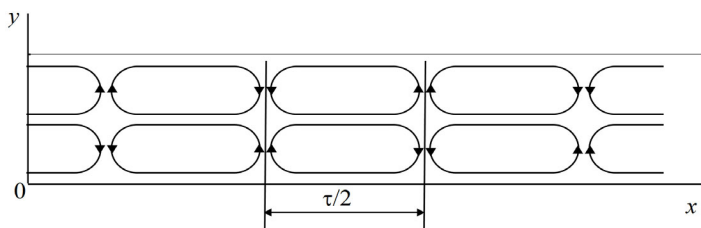


Рис. 3. Контурсы токов двойной частоты

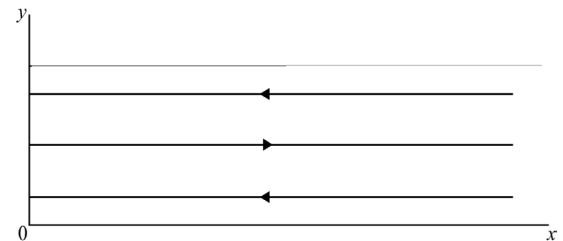


Рис. 4. Линии токов нулевой частоты

Для случая движения электропроводящей жидкости по плоскому каналу с непроводящими боковыми стенками можно получить [1]

$$h_1 = \varepsilon h \sin \frac{\pi y}{d} \cos(\omega t - \alpha x),$$

$$h_0 = -\frac{4}{3} \frac{\beta}{z_{20}} \varepsilon h \sin \frac{2\pi y}{d},$$

$$h_2 = -\frac{4}{3} \frac{\beta}{z_{22}} \varepsilon h \sin \frac{2\pi y}{d} \cos 2(\omega t - \alpha x),$$

где  $\varepsilon = \frac{\sigma_0 \mu_0 \omega}{\alpha^2}$ ,  $h = -\frac{4s}{\pi z}$ ,  $s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega}$ ,  $z = z_{11} + \left(\frac{4}{3}\beta\right)^2 \left(\frac{2}{z_{20}} + \frac{1}{z_{22}}\right)$ ,

$$z_{mn} = \left(\frac{m\pi}{d}\right)^2 + n^2, \quad \beta = \frac{\beta_m}{d}, \quad \beta_m = \frac{eB_{m1}}{m} \tau_e, \quad d = \alpha d^0, \quad \alpha = \frac{\pi}{\tau}, \quad \sigma_0 = \frac{ne^2}{m} \tau_e,$$

здесь  $h_1$ ,  $h_0$ ,  $h_2$  – напряжённости магнитных полей, обусловленных индуцированными в жидкости токами основной, нулевой и двойной частот, отнесённые к амплитудному значению напряжённости внешнего поля;  $\omega$  – частота внешнего поля;  $\omega_1$  – частота, соответствующая скорости движения жидкости;  $B_{m1}$  – амплитуда индукции внешнего поля;  $\sigma_0$  – скалярная электропроводность жидкости.

Найдём соотношение между магнитными полями в жидкости при тензорной ( $h$ ) и скалярной проводимости ( $h_c$ ), для этого  $h_c$  определим следующим образом:

$$h_c = -\frac{4s}{\pi} \frac{d^2}{\pi^2 + d^2},$$



при этом составляющая индуктированного поля в условиях скалярной электропроводности будет равна

$$h_{1c} = \varepsilon h_c \sin \frac{\pi y}{d} \cos(\omega t - \alpha x).$$

Следовательно,  $h/h_c = a_1$  представляет отношение токов основной частоты для случаев тензорной и скалярной проводимостей. Его значения приведены на рис. 5. Таким образом, из-за тензорного характера проводимости наблюдается уменьшение токов основной частоты. Это уменьшение тем значительнее, чем больше отношение ширины канала к полюсному делению  $d = \pi d^0/\tau$ . С увеличением  $d$  величина  $a_1$  асимптотически приближается к пределу, равному

$$\left[ 1 + \frac{8}{9} \left( \frac{\beta_m}{\pi} \right)^2 \right]^{-1}.$$

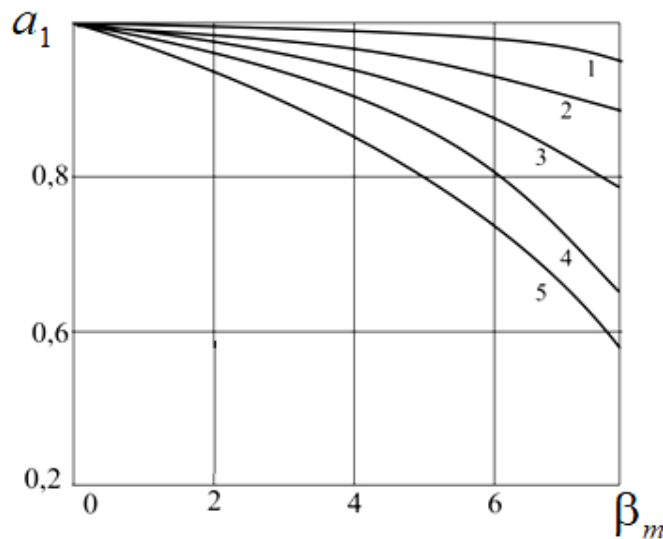


Рис. 5. Зависимости отношения токов основной частоты от  $\beta_m$ :

кривая 1 –  $d = 0,2$ ; кривая 2 –  $d = 0,4$ ; кривая 3 –  $d = 0,6$ ;  
кривая 4 –  $d = 0,8$ ; кривая 5 –  $d = 1,0$

**Оценка токов нулевой и двойной частоты.** Выполним аналогичную оценку токов нулевой и двойной частот. Максимальное значение плотности постоянного тока имеем при значениях  $y = 0 \dots d^0/2$ ;  $d^0 = \frac{8}{3} \frac{\pi \beta}{dz_{20}} \varepsilon h$ :

$$\frac{2\pi}{3sd} \frac{\beta}{z_{20}} h = \frac{8}{3d} \frac{\beta}{zz_{20}} = a_0.$$

Соответствующая оценка максимума  $x$ -составляющей плотности тока двойной частоты даётся выражением

$$\frac{2\pi}{3sd} \frac{\beta}{z_{22}} h = \frac{8}{3d} \frac{\beta}{zz_{22}} = a_2.$$

На рис. 6 представлены графики для величин  $a_0$  и  $a_2$ . Наблюдаемое увеличение токов нулевой и двойной частот с ростом  $d$  происходит до определённого значения  $d$ . В дальнейшем плотность постоянного тока стремится к пределу

$$\frac{2\beta_m}{3\pi^2} \left[ 1 + \frac{8}{9} \left( \frac{\beta_m}{\pi} \right)^2 \right]^{-1},$$

а токи двойной частоты при  $d \rightarrow \infty$  исчезают совсем.

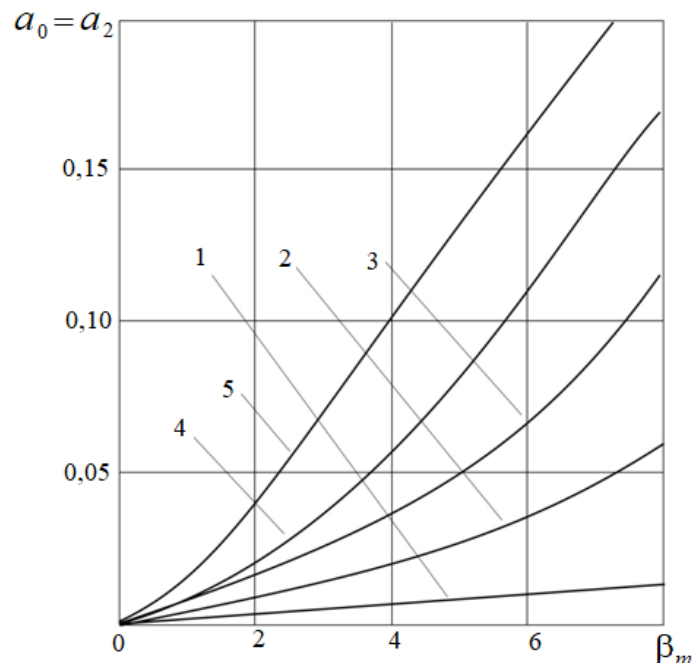


Рис. 6. Зависимости отношения токов нулевой и двойной частоты от  $\beta_m$  :  
кривая 1 –  $d = 0,2$ ; кривая 2 –  $d = 0,4$ ; кривая 3 –  $d = 0,6$ ; кривая 4 –  $d = 0,8$ ; кривая 5 –  $d = 1,0$

В электромагнитном отношении предельный переход  $d \rightarrow \infty$  соответствует случаю движения жидкости по каналу с идеально проводящими боковыми стенками. Таким образом, в канале этого типа тензорность проводимости обуславливает уменьшение токов основной частоты и появление постоянного тока.

Рассмотрим теперь конфигурацию, обладающую осевой симметрией, т. е. случай потока анизотропно проводящей жидкости в коаксиальных каналах при воздействии бегущего магнитного поля.

При такой конфигурации и относительно малой высоте канала, когда осевая составляющая внешнего магнитного поля пренебрежимо мала по сравнению с радиальной, поэтому последнюю можно считать неизменной по высоте канала, осевого тока нет. Отсутствие тока означает, что в продольном направлении индуцируется электрическое поле  $E_z$ , которое полностью подавляет действие лоренцевых сил, обусловленных радиальным магнитным и азимутальным электрическим полями [6–15].

Найдём продольную ЭДС для такого случая.

Из уравнения (1) при принятых ранее допущениях для продольной и азимутальной скоростей электронов соответственно следует

$$v_{ez} = -b_e \frac{E_z - \omega_e \tau_e (E_\varphi - u_1 B_\rho)}{1 + (\omega_e \tau_e)^2}, \quad v_{e\varphi} = -b_e \frac{E_\varphi - u_1 B_\rho + \omega_e \tau_e E_z}{1 + (\omega_e \tau_e)^2},$$



где  $E_z$  и  $E_\phi$  – напряжённости осевого и азимутального электрических полей;  $B_\rho = B_{m1} \sin(\omega t - \alpha x)$  – основная волна индукции радиального магнитного поля,  $\omega_e = eB_\rho / m = \beta_m \tau_e^{-1} (\omega t - \alpha x)$ . Так как  $v_{ez} = 0$ , то

$$E_z = \omega_e \tau_e (E_\phi - u_1 B_\rho), \quad v_{e\phi} = -b_e (E_\phi - u_1 B_\rho).$$

Можно записать

$$E_\phi - u_1 B_\rho = (u - u_1) B_\rho = (u - u_1) B_{m1} \sin(\omega t - \alpha x),$$

где  $u$  – фазовая скорость бегущей волны внешнего поля. Тогда

$$E_z = \beta_{\phi} (u - u_1) B_{\phi} [1 - \cos 2(\omega t - \alpha x)],$$

где  $\beta_{\phi} = \beta_m / \sqrt{2}$ ,  $B_{\phi} = B_{m1} / \sqrt{2}$ . Продольная ЭДС на длине канала  $l = 2p\tau$  будет равна

$$e_z = 2p \int_0^{\tau} E_z dz = -\beta_{\phi} u_1 s B_{\phi} l, \quad s = \frac{u_1 - u}{u},$$

где  $p$  – число волн внешнего магнитного поля по длине канала.

Таким образом, в данном случае, когда холловский ток запрещён, между входным и выходным сечениями канала в осевом направлении действует стационарная ЭДС Холла.

**Заключение.** В плоском канале токи двойной частоты могут отсутствовать при наличии идеально проводящих боковых стенок; в этом случае ток нулевой частоты, протекающий вдоль канала, достигает некоторого предельного значения, а токи основной частоты меньше, чем при изотропной проводимости.

В канале коаксиальной конфигурации холловский ток отсутствует, но вдоль канала действует продольная ЭДС Холла.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Электромагнитные процессы в анизотропно электропроводной жидкости в бегущем магнитном поле / К. И. Ким, К. К. Ким, А. Ю. Панычев, Л. С. Блажко // Бюллетень результатов научных исследований. – 2021. – Вып. 2. – С. 7-14.
2. Ким, К. К. МГД-генераторы на поршневых потоках (MHD-generators on piston flows) / К. К. Ким, К. И. Ким. – М.: Маршрут, 2005. – 300 с.
3. Ким, К. И. Экспертное исследование влияния магнитного поля на неустойчивость Релея-Тейлора / К. И. Ким, К. К. Ким, С. Н. Иванов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 70-74.
4. Gavrish S. V. Processes of Development and Relaxation of Plasma Channel in the Pulse-Periodic Cesium–Mercury–Xenon Discharge // Plasma physics reports. 2021. – Vol. 47. – P. 96-99. DOI.org/10.1134/S1063780X21010074.
5. Goudarzi S. and Babae H. Results of the Preliminary Experiments with a Miniaturized Plasma Focus Device // Plasma physics reports. – 2020. – Vol. 46. – № 1. – P. 103-195. DOI.org/10.1134/S1063780X20010080.
6. Alekseev A. I., Vaulin D. N., Deshko K. I. and Chernikov V. A. Study of the Possibility to Use a Magnetoplasma Compressor for Plasma-Assisted Combustion in a High-Speed Flow // Plasma physics reports. – 2018. – Vol. 44. – № 8. – P. 766-774. DOI.org/10.1134/S1063780X18080019.
7. Jie Mao, Mingliang Jin and Chao Xu. Numerical simulation of magnetohydrodynamic laminar flow in an electrically conducting circular pipe with V-shaped strips // Plasma physics reports. – 2021. – Vol. 57. – № 1. – P. 3-16. DOI.org/10.22364/mhd.57.1.1.
8. Zhao Y., Tao J., Hong W. and Hollerbach R. Intermittency in magnetohydrodynamic Taylor-Couette flow with the free-slip top and bottom walls // Plasma physics reports. – 2020. – Vol. 56. – № 4. – P. 393-402. DOI.org/10.22364/mhd.56.4.4.



9. Guseva R. Hollerbach, Willis A. P. and Avila M. Azimuthal magnetorotational instability at low and high magnetic Prandtl numbers // *Magneto hydrodynamics*. – 2017. – Vol. 53. – № 1. – P. 25-34. DOI.org/10.22364/mhd.53.1.4.
10. Pyatnitskaya N. Yu., Sviridov E. V. and Razuvanov N. G. Experimental study of liquid metal heat transfer in a vertical heated channel affected by a coplanar magnetic field // *Magneto hydrodynamics*. – 2016. – Vol. 52. – № 1/2. – P. 171-180. DOI.org/10.22364/mhd.52.1.20.
11. Kim K. K., Karpova I. M. A magnetogasdynamic model of a welding arc // *Russ. Electr. Engin.* – 2016. – № 87. – P. 46-50. DOI.org/10.3103/S1068371216010053.
12. Kim K. K., Spichkin G. L., Chistov E. K., Groshev G. M., Kotenko A. G., Kostrominov A. M. A plasma device for increasing the hydrophilicity of paper products // *Russ. Electr. Engin.* – 2017. – T. 88. – № 10. – P. 657-660. DOI.org/10.3103/S106837121710008X.
13. Kim K. K., Ivanov S. N. Formation and study of coatings from composite material for special electrical devices. 14th International Conference on Films and Coatings IOP Conf. Series // *Journal of Physics: Conf. Series*. – 2019. – Vol. 1281. – 012034, IOP Publishing. DOI.org/10.1088/1742-6596/1281/1/012034.
14. Ivanov S. N., Pashenko F. F., Amosov O. S. The synthesis of the control system of electromechanical converters // *Sensors & Systems*. – 2006. – № 8. – P. 18-24.
15. Кузнецов, А. А. Об определении показателей достоверности и возможностей контроля количественного состава материалов (About determining the reliability indicators and the possibilities of controlling the quantitative composition of materials) / А. А. Кузнецов, О. Б. Мешкова // *Омский научный вестник*. – 2009. – № 2. – С. 180-184.



**Ким К. И., Ким К. К., Иванов С. Н.**  
**K. I. Kim, K. K. Kim, S. N. Ivanov**

## **КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ РЕЖИМА САМОВОЗБУЖДЕНИЯ АСИНХРОННОГО ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА**

### **CRITERIA FOR THE STABILITY OF THE SELF-EXCITATION REGIME OF A LIQUID-METAL ASYNCHRONOUS MAGNETIC HYDRODYNAMIC GENERATOR**

**Ким Константин Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Konstantin I. Kim** – Dr. Sc., Professor, Theoretical Electrical Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av., Sankt-Petersburg, Russia; tel. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Ким Константин Константинович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и теплоэнергетики Петербургского государственного университета путей сообщения (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, Московский пр., д. 9; тел. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Konstantin K. Kim** – Dr. Sc., Professor, Trinity College, Cambridge University, Great Britain. Professor, Dr.habil.ing.; member of IEEE, NYAS, EANS Head of Theoretical Electrical Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av., Sankt-Petersburg, Russia; tel. 8(903)096-57-70. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Иванов Сергей Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

**Sergey N. Ivanov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Electrical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: ivanov.sn@email.knastu.ru.

**Аннотация.** Рассматривается режим работы асинхронного жидкометаллического МГД-генератора (АМГДГ) на нагрузку при отсутствии источника опережающей реактивной мощности, когда его вводы зашунтированы конденсаторной батареей. Излагаются аспекты расчёта установившегося режима асинхронного самовозбуждения для двух случаев: при работе генератора на активную постоянную нагрузку и на асинхронный привод. При условии пренебрежения переходными процессами в АМГДГ (правомерность этого обусловлена малостью постоянных времени по сравнению с механической постоянной времени, обусловленной инерцией потока жидкого металла) для указанных случаев выводятся критерии устойчивости самовозбуждения по отношению к малым возмущениям.

**Summary.** We consider the operation regime of an asynchronous liquid metal MHD-generator (AMHDG) to the load at the absence of a source of advanced reactive power when its inputs are shunted by a capacitive bank. The aspects of calculating the steady regime of asynchronous self-excitation for two cases are described: when the generator is operating to the active constant load and to the asynchronous drive. Under the condition that we neglect the transients in the AMHDG (the validity of this condition is due to the smallness of the time constants compared to the mechanical time constant due to the inertia of the liquid metal flow) the criteria for the stability of self-excitation to small perturbations are derived for these cases.

**Ключевые слова:** асинхронный жидкометаллический МГД-генератор, асинхронное самовозбуждение, критерии устойчивости самовозбуждения, малые возмущения.

**Key words:** asynchronous liquid metal MHD generator, asynchronous self-excitation, self-excitation stability criteria, small perturbations.

УДК 621.313.12

Рассмотрим случай работы асинхронного жидкометаллического МГД-генератора (АМГДГ) на нагрузку при отсутствии источника опережающей реактивной мощности, когда его вводы зашунтированы конденсаторной батареей. Известно, что в этом случае при определённых значениях параметров данной системы и скорости жидкого металла возможен установившийся режим самовозбуждения генератора.

С позиций понятий теории электрических машин [1; 2] самовозбуждение АМГДГ следует рассматривать как асинхронное, так как бегущее магнитное поле статора, обусловленное полем его остаточного намагничивания, имеет меньшую скорость (которая определяется параметрами системы), чем жидкометаллический поток. В связи с этим по отношению к указанному полю наблюдается генераторный режим, при котором кинетическая энергия жидкометаллического потока преобразуется в электрическую, которая и потребляется активными элементами системы. Если эта потребляемая энергия полностью покрывается за счёт генерируемой электрической энергии, то такой режим считается режимом самовозбуждения. При таком режиме амплитуда и частота тока статора не меняются с течением времени. Данный режим характеризует границу области самовозбуждения – области неустойчивой работы системы по отношению к малым возмущениям.

Рассмотрим два случая. В первом случае активное сопротивление нагрузки предполагается постоянным, а в другом – является функцией частоты тока статора и его напряжения (асинхронная нагрузка).

Установившийся режим самовозбуждения АМГДГ можно рассмотреть, используя эквивалентную схему генератора, показанную рис. 1 [4]. На рисунке использованы следующие обозначения:  $r_l$  и  $x_l$  – активное и реактивное сопротивления активной стороны витка статорной обмотки;  $x_m$  – реактанс взаимной индукции между статорной обмоткой и жидким металлом;  $r_\Delta$  – приведённое значение сопротивления фазы статорной обмотки, эквивалентной проводящему слою (толщиной  $\Delta$ ) стенки канала МГД-генератора;  $r_2$  – приведённое значение фазы для жидкого металла;  $x_2$  – реактанс рассеяния жидкого металла;  $s$  – скольжение.

Эквивалентное сопротивление в соответствии с рис. 1 равно

$$z_\Gamma = R_\Gamma + jX_\Gamma,$$

$$R_\Gamma = r_l + x_m^2 r_\Delta \frac{x_2^2 - (r_\Delta - r_2 / s) r_2 / s}{(x_m x_2 + r_\Delta r_2 / s)^2 + (r_\Delta X_2 - x_m r_2 / s)^2},$$

$$X_\Gamma = x_l + x_m r_\Delta^2 \frac{x_2 X_2 + (r_2 / s)^2}{(x_m x_2 + r_\Delta r_2 / s)^2 + (r_\Delta X_2 - x_m r_2 / s)^2},$$

где  $X_2 = x_m + x_2$ ;  $s = u_1 / (u - 1)$ , здесь  $u_1$  – скорость жидкого металла;  $u$  – скорость бегущего поля.

Тогда электрическая схема рассматриваемой системы получает вид, показанный на рис. 2. На этой схеме  $X_C$  – сопротивление конденсаторной батареи,  $z_H = R_H + jX_H$  – сопротивление нагрузки.

Установившийся режим самовозбуждения соответствует резонансу в схеме рис. 2.

Отсюда следуют два уравнения, которыми определяется указанный режим:

$$R_H |z_\Gamma|^2 + R_\Gamma |z_H|^2 = 0, \quad (1)$$

$$\frac{X_H |z_\Gamma|^2 + X_\Gamma |z_H|^2}{(R_\Gamma + R_H)^2 + (X_\Gamma + X_H)^2} - X_0 = 0, \quad (2)$$

где

$$|z_\Gamma|^2 = R_\Gamma^2 + X_\Gamma^2, \quad |z_H|^2 = R_H^2 + X_H^2.$$



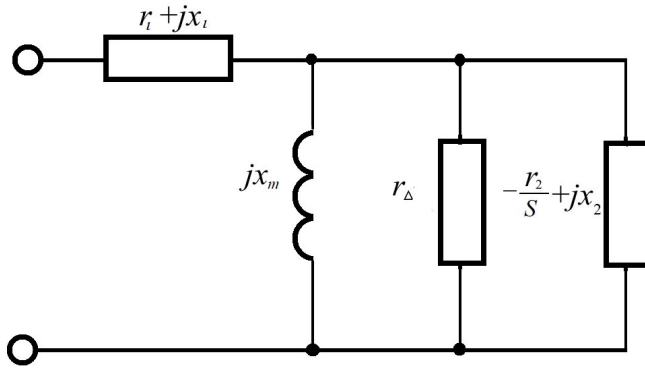


Рис. 1. Эквивалентная схема генератора в установившемся режиме самовозбуждения

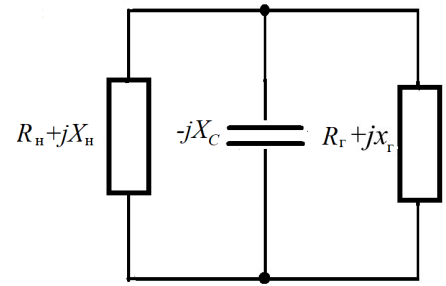


Рис. 2. Схема замещения

Выражения (1) и (2) нужно дополнить уравнением импульсов, действующих на жидкий металл. Данное уравнение можно записать следующим образом:

$$m \frac{du_1}{dt} = F_+ + F_- , \quad (3)$$

где  $m$  – масса жидкого металла в объёме канала;  $F_+$  – сила, соответствующая полной гидравлической мощности МГД канала,  $F_-$  – тормозящая сила в канале. Сила  $F_+$  выражается через давление  $p_H$  и  $p_K$  в начале и конце канала и его поперечное сечение  $S$ :

$$F_+ = (p_H - p_K)S .$$

Данную силу выразим следующим образом:

$$F_+ = F_0(1 - k'_0 u_1) , \quad F_0 = \text{const} , \quad k'_0 = \text{const} .$$

Сила  $F_-$  равна

$$F_- = F_+ + F_3 , \quad F_T = F_+ + F_- ,$$

где  $F_T$  – сумма сил трения жидкого металла о стенки канала и об изоляционные перегородки в концевых зонах,  $F_T = -k'_T u_1^2$ , здесь  $k'_T$  – коэффициент, определяемый по известным формулам гидравлики;  $F_3$  – электромагнитная сила, отвечающая электромагнитной мощности и мощности джоулевых потерь в канале без эффекта ограниченности его ширины,

$$F_3 = -\frac{3}{2} \frac{x_m^2 \alpha s}{r_2 [(x_m r_\Delta^{-1} - x_m r_2^{-1} s)^2 + 1] \omega |z_\Gamma|^2} , \quad \alpha = \frac{\pi}{\tau} ,$$

где  $\tau$  – полюсное деление;  $\omega$  – циклическая частота напряжения статора.

Уравнение (3) запишем в виде уравнения моментов, для этого его умножим на  $1/\alpha = \tau/\pi$ .

Имеем

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_0(1 - k_0 \omega_1) - k_t \omega_1^2 - M_\Gamma , \quad (4)$$

где  $J_1$  – момент инерции;  $M_0 = F_0 / \alpha$ ;  $k_0 = k'_0 / \alpha$ ;  $k_t = k'_t / \alpha^2$ ;  $M_\Gamma = F_\Gamma / \alpha$ . Параметры в (1), (2) и (4) требуется привести к некоторой фиксированной частоте  $\omega_0$ , в качестве которой можно взять синхронную частоту. Также введём следующие обозначения:

$$v_i = \omega_i / \omega_0 , \quad v = \omega / \omega_0 , \quad x = x^{(0)} v , \quad s = (v_1 - v) / v ,$$

где  $x^{(0)} = \text{const}$  – индуктивное сопротивление при частоте  $\omega_0^*$ . Тогда (1), (2) и (4) можно записать следующим образом:

$$R_H |z_\Gamma(v_1, v)|^2 + R_\Gamma(v_1 v) |z_H|^2 = 0, \quad (5)$$

$$\frac{X_H |z_\Gamma(v_1 v)|^2 + X_\Gamma(v_1 v) |z_H|^2}{[R_\Gamma(v_1, v) + R_H]^2 + [X_\Gamma(v_1, v) + X_H]^2} - X_c^{(0)}(v) = 0, \quad (6)$$

$$J_1^{(0)} \frac{dv_1}{dt} = M_0(1 - k_0^{(0)}v_1) - k_T^{(0)}v_1^2 - M_\Gamma(v_1, v, U_m), \quad (7)$$

$$J_1^{(0)} = J_1\omega_0, \quad k_0^{(0)} = k_0\omega_0, \quad k_T^{(0)} = k_T\omega_0^2.$$

Рассмотрим установившийся режим самовозбуждения АМГДГ при  $R_H = \text{const}$ ,  $X_H = 0$ . В этом случае в уравнениях (5) – (7) необходимо предположить  $J_1^{(0)} = 0$ . Величины  $v_1$ ,  $v$  и  $U_m$  являются неизвестными, если считать заданным ёмкостное сопротивление  $X_c^{(0)}$ . Но в действительности  $X_c^{(0)}$  необходимо выбирать. Это требует наличия ограничения, которое будет заключаться в требовании незначительности скольжения генератора в установившемся режиме и самовозбуждения, т.е. из потенциально возможных значений скольжения необходимо выбирать наименьшее. Это позволяет допустить  $r_\Delta = \text{const}$ , т.к.  $r_\Delta$  зависит от  $(1+s)^2$  [5].

Связь между частотами  $v_1$  и  $v$  даётся уравнением (5). Понятно, что данные величины будут вещественными и положительными. Зависимостей  $v_1 = \varphi_v(v)$ , при которых удовлетворяется (5), может быть несколько. Например, как показано на рис. 3, четыре кривых (1 – 4)  $v_1 = \varphi_v(v)$  соответствуют случаю:  $x_m^{(0)} = 0,475$  Ом,  $x_l^{(0)} = 0,113$  Ом,  $r_2 = 0,0211$  Ом,  $r_\Delta = 1$  Ом,  $R_H = 0,02$  Ом. Верхний индекс (0) означает, что параметр приведён к частоте  $\omega_0$ .

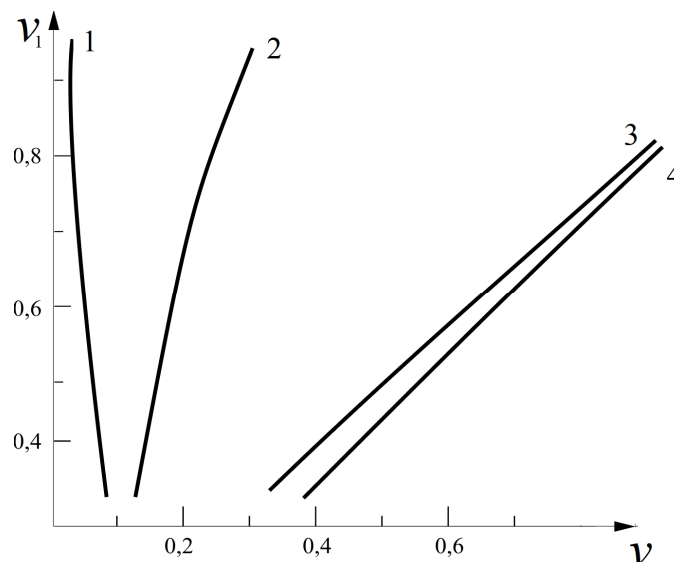


Рис. 3. Зависимость между частотами  $v_1$  и  $v$

Если изменить значение  $R_H$ , оставляя неизменными остальные параметры генератора, то количество этих зависимостей тоже изменится. Особо отметим, что типов кривых  $v_1 = \varphi_v(v)$  может быть два в зависимости от знака  $dv_1/dv$ .

Вполне конкретное значение  $X_c^{(0)}$  соответствует каждой паре  $v_1$  и  $v$ , относящихся к одной и той же кривой  $v_1 = \varphi_v(v)$ . По уравнению (6) можно определить  $X_c^{(0)}$ , значения которого приведены на рис. 4. Нумерация кривых совпадает с рис. 3. Разрывам между отдельными кривыми соответствует  $X_c^{(0)}$ , при которых и указанных выше параметрах системы режим установившегося самовозбуждения принципиально невозможен.

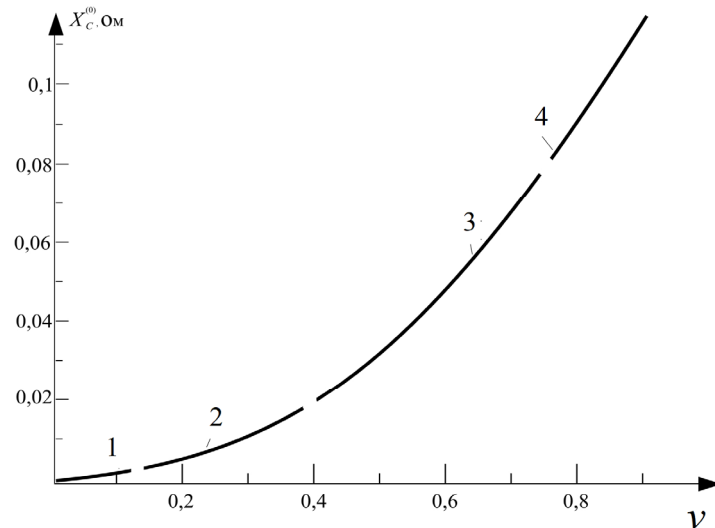


Рис. 4. График для нахождения  $X_c^{(0)}$

Напряжение генератора рассчитывается по уравнению (7).

На рис. 5 приведены значения напряжения, соответствующие кривым на рис. 3 и 4. Отметим, что знак у производной  $dU_m / dv$  может быть как положительным, так и отрицательным.

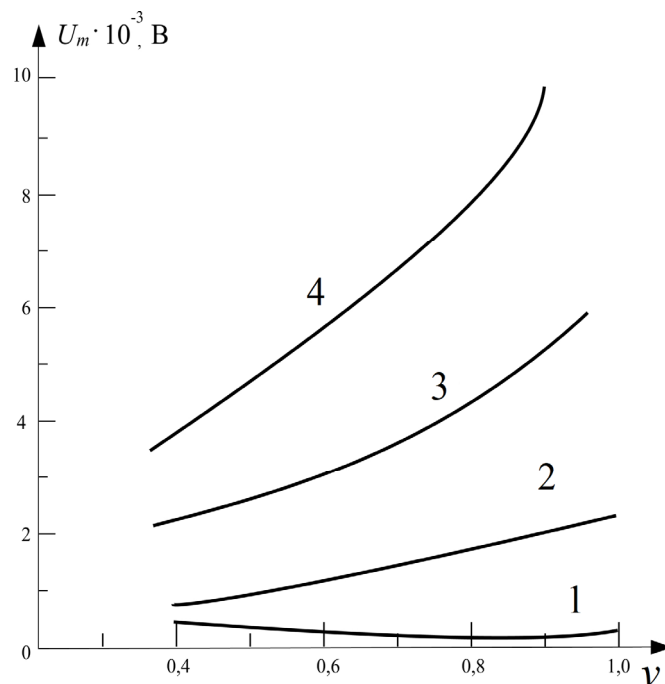


Рис. 5. Зависимость напряжения от частоты



Вероятные режимы самовозбуждения описываются уравнениями (5) – (7), которые требуется проверить на устойчивость к малым возмущениям. При исследовании этого вопроса в целях упрощения будем пренебрегать переходными электромагнитными процессами в генераторе. Это стало возможным из-за предположения, что постоянные времени данных процессов можно считать малыми по сравнению с механической постоянной времени, обусловленной инерционными свойствами жидкометаллического потока.

Допустим, что нижеперечисленные величины получили малые возмущения ( $\Delta v_1$ ,  $\Delta v$ ,  $\Delta U_m$ ), тогда

$$v_i = v_{i0} + \Delta v_i, \quad v = v_0 + \Delta v, \quad U_m = U_{m0} + \Delta U_m, \quad (8)$$

где  $v_{i0}, v_0, U_{m0}$  – невозмущённые значения.

Если подставить (8) в (7), можно получить следующие соотношения:

$$J_1^{(0)} \frac{d}{dt} \Delta v_1 = -(M_0 k_0^{(0)} + 2k_T^{(0)} v_{i0}) \Delta v_1 - \Delta M_\Gamma,$$

$$\Delta M_\Gamma = \frac{\partial M_\Gamma}{\partial U_m} \Delta U_m + \frac{\partial M_\Gamma}{\partial v_1} \Delta v_1 + \frac{\partial M_\Gamma}{\partial v} \Delta v. \quad (9)$$

Здесь значения производных от  $M_\Gamma$  берутся в точке, соответствующей невозмущённым значениям.

Чтобы выявить связь между величинами  $\Delta v$  и  $\Delta v_1$ ,  $\Delta U_m$  и  $\Delta v_1$ , требуется исследовать зависимости  $v_1 = \varphi_v(v)$ ,  $U_m = \varphi_U(v_1)$ , рассчитанные по уравнениям (5) – (7) при  $J_1^{(0)} = 0$ , в окрестности точки невозмущённого режима. В результате получим  $\Delta U_m = k'_U \Delta v_1$ ,  $\Delta v = k'_v \Delta v_1$ .

Из рис. 3 и 5 видно, что коэффициенты  $k'_U$  и  $k'_v$  могут быть как положительными, так и отрицательными.

Формулу (9) можно переписать следующим образом:  $\Delta M_\Gamma = k'_M \Delta v_1$ , где  $k'_M = \frac{\partial M_\Gamma}{\partial U_m} k'_U + \frac{\partial M_\Gamma}{\partial v_1} + \frac{\partial M_\Gamma}{\partial v} k'_v$ . Учитывая это, можем сформулировать критерий устойчивости режима самовозбуждения в виде

$$M_0 k_0^{(0)} + 2k_T^{(0)} v_{i0} + k'_M > 0. \quad (10)$$

Предположим, что к АМГДГ подсоединена переменная нагрузка, например, асинхронная. То есть АМГДГ работает на асинхронный двигатель, на валу которого действует некоторый переменный момент сопротивления  $M_C$ . Тогда параметры нагрузки и относительную частоту вращения ротора асинхронного двигателя в (5) и (6) можно выразить следующим образом:  $R_H = R_H(v, v_2)$ ,  $X_H = X_H(v, v_2)$ ,  $v_2 = \omega_2 / \omega_0$ , где  $\omega_2$  – частота вращения ротора асинхронного двигателя.

Уравнение вращательного движения ротора асинхронного двигателя выглядит следующим образом:

$$J_2^{(0)} \frac{dv_2}{dt} = M_D - M_C, \quad (11)$$

где  $J_2^{(0)} = J_2 \omega_0$  ( $J_2$  – момент инерции привода);  $M_D$  – электромагнитный момент двигателя,  $M_D = M_D(v, v_2, U_m)$ .

Таким образом, уравнениями (5) – (7) и (11) (при  $J_1^{(0)} = J_2^{(0)} = 0$ ) описывается установившийся режим самовозбуждения генератора, при котором  $v_1 > v > v_2$ ,  $U_m > 0$ ,  $v_2$  – неотрицательное число.

Первый критерий устойчивости (10) остаётся в силе, а второй критерий необходимо сформулировать.

Если уравнение (11) записать для значений возмущённых величин, получим

$$J_2^{(0)} \frac{d}{dt} \Delta v_2 = \Delta M_{\text{д}} - \Delta M_{\text{с}},$$

$$\text{где } \Delta M_{\text{д}} = \frac{\partial M_{\text{д}}}{\partial U_m} \Delta U_m + \frac{\partial M_{\text{д}}}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial M_{\text{д}}}{\partial v_2} \Delta v_2, \quad \Delta M_{\text{с}} = \frac{\partial M_{\text{с}}}{\partial v_2} \Delta v_2.$$

Если обозначить  $\Delta M_{\text{д}} = k''_M \Delta v_2$  и допустить, что в точке, соответствующей невозмущённым величинам ( $v_{10}$ ,  $v_0$ ,  $v_{20}$ ,  $U_{m0}$ ),  $\Delta U_m = k''_U \Delta v_2$ ,  $\Delta v = k''_v \Delta v_2$ , можно найти второй критерий устойчивости:

$$k''_M - \frac{\partial M_{\text{с}}}{\partial v_2} < 0. \quad (12)$$

Таким образом, устойчивость режима самовозбуждения определяется выполнением критериев (11) и (12).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Важнов, А. И. Основы теории переходных процессов синхронной машины / А. И. Важнов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 312 с.
2. Вольдек, А. А. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом / А. А. Вольдек. – Л.: Энергия, 1970. – 272 с.
3. Ким, К. И. Экспертное исследование влияния магнитного поля на неустойчивость Релея-Тейлора / К. И. Ким, К. К. Ким, С. Н. Иванов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 70-74.
4. Ким, К. К. Групповое свойство уравнений индукции для сплошной среды с нелинейной электропроводностью МГД-генератора / К. К. Ким // Вестник инж. электромехаников ж.-д. трансп. Самар. гос. акад. путей сообщ. – 2003. – № 1. – С. 433-443.
5. Ким, К. К. Расчёт мощности устройства формирования поршневых потоков жидкого металла МГД-генератора / К. К. Ким // Вестник Петербургского государственного университета путей сообщения. – 2003. – Вып. 1. – С. 110-113.

**Феоктистов С. И., Андрианов И. К.**

**S. I. Feoktistov, I. K. Andrianov**

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТОЛСТОСТЕННЫХ  
ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБОЛОЧЕК, НАГРУЖЕННЫХ ВНУТРЕННИМ  
ДАВЛЕНИЕМ**

**DETERMINATION OF THE BEARING CAPACITY OF THICK-WALLED AXISYMMETRIC  
SHELLS LOADED WITH INTERNAL PRESSURE**

**Феоктистов Сергей Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Авиационное» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: serg\_feo@mail.ru.

**Sergey I. Feoktistov** – Doctor of Engineering, Professor, Aircraft Industry Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin str., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: serg\_feo@mail.ru.

**Андрианов Иван Константинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Общая физика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.

**Ivan K. Andrianov** – Phd in Engineering, Assistant Professor, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin str., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.

**Аннотация.** В работе рассмотрен вопрос определения несущей способности толстостенных оболочек в осесимметричной и центрально-симметричной постановке задачи. Задача решалась методом переменных параметров упругости при степенной аппроксимации диаграммы деформирования материала. Приведено сравнение полученных результатов с имеющимися аналитическими решениями для тонкостенных оболочек. Получены формулы, позволяющие с большой точностью определить несущую способность толстостенной оболочки при различных относительных толщинах для физически нелинейного материала.

**Summary.** The paper considers the issue of determining the bearing capacity of thick-walled shells in an axisymmetric and centrally symmetric formulation of the problem. The problem was solved by the method of variable elasticity parameters with a power approximation of the deformation diagram of the material. The results obtained are compared with the available analytical solutions for thin-walled shells. Formulas are obtained that make it possible to determine with great accuracy the bearing capacity of a thick-walled shell at different relative thicknesses for a physically nonlinear material.

**Ключевые слова:** толстостенная оболочка, несущая способность, переменные параметры упругости, физическая нелинейность материала.

**Key words:** thick-walled shell, load-bearing capacity, variable elasticity parameters, physical nonlinearity of the material.

УДК 593.3

Толстостенные осесимметричные оболочки в настоящее время находят всё более широкое применение в различных инженерных конструкциях: это сосуды высокого давления, кольцевые фундаменты, напорные трубы, тоннели и др. Напряжения в таких конструкциях распределяются по толщине неравномерно, что необходимо учитывать при расчёте на прочность. В большинстве известных решений рассматривается упругопластическая модель материала без упрочнения или с линейным упрочнением, но при определении предельных нагрузок необходимо учитывать и физическую нелинейность материала – закон упрочнения при пластическом деформировании.

Основными уравнениями для расчётов за пределами упругости по деформационной теории являются: дифференциальные уравнения равновесия, условия совместности деформаций, зависимость между деформациями и напряжениями и условия на поверхности.

Рассмотрим цилиндрическую толстостенную оболочку бесконечной длины (стеснённую оболочку), которая находится под действием внутреннего давления. В этом случае можно считать, что длина оболочки не меняется, т.е. деформация вдоль оболочки отсутствует, **деформированное состояние плоское** и  $e_z = 0$ .

В случае постоянного давления касательные напряжения вдоль цилиндрической оболочки отсутствуют, производные по  $z$  равны нулю, а условия равновесия определяются одним уравнением [1]:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r}. \quad (1)$$

Уравнения совместности логарифмических деформаций для осесимметричного деформированного состояния можно записать в виде дифференциального уравнения [2]:

$$\frac{de_\theta}{dr} = \frac{1 - \exp(e_\theta - e_r)}{r}, \quad (2)$$

где  $e_r = \ln(dr/dr)$  и  $e_\theta = \ln(r/r)$  – соответственно радиальные и тангенциальные (окружные) логарифмические деформации.

Уравнения связи между напряжениями и деформациями, в соответствии с методом переменных параметров упругости (МППУ) [3; 4], запишем в виде

$$\left. \begin{aligned} e_r &= \frac{1}{E^*} [\sigma_r - \mu^*(\sigma_\theta + \sigma_z)] \\ e_\theta &= \frac{1}{E^*} [\sigma_\theta - \mu^*(\sigma_z + \sigma_r)] \\ e_z &= \frac{1}{E^*} [\sigma_z - \mu^*(\sigma_r + \sigma_\theta)] \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где  $E^*$  и  $\mu^*$  – переменные параметры упругости.

Для несжимаемого тела, у которого  $\mu = 0,5$ , имеем

$$E^* = E_{сек} = \frac{\sigma_i}{e_i}, \quad \mu^* = 0,5, \quad (4)$$

где  $\sigma_i$  – интенсивность напряжений;  $e_i$  – интенсивность логарифмических деформаций.

Интенсивности напряжений и логарифмических деформаций в главных напряжениях и деформациях определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} \sigma_i &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2} \\ e_i &= \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_r - e_\theta)^2 + (e_\theta - e_z)^2 + (e_z - e_r)^2} \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

Диаграмма деформирования материала как связь между интенсивностью напряжений и интенсивностью логарифмических деформаций задаётся линейно-степенной функцией:

$$\sigma_i = \begin{cases} E e_i & \text{при } e_i \leq e_{it} \\ A e_i^n & \text{при } e_i > e_{it} \end{cases}. \quad (6)$$

Условия на наружной поверхности оболочки (граничные условия): при  $r = R$ ,  $e_\theta = e_{\theta R} = \ln(R/R_0)$ ,  $\sigma_{rR} = 0$ .

Поставленную задачу будем решать методом переменных параметров упругости. Для успешной реализации этого метода необходимо получить интегральные уравнения.

В уравнении совместности логарифмических деформаций (2) проведём замену:



$$\frac{de_\theta}{d\rho} = \frac{1}{\exp(e_\theta)} \frac{d(\exp(e_\theta))}{d\rho},$$

и запишем данное уравнение в виде

$$\frac{d(\exp(e_\theta))}{d\rho} = \frac{1}{\rho} \exp(e_\theta) - \frac{1}{\rho} \exp(2e_\theta - e_\rho). \quad (7)$$

Рассматривая уравнение (7) как нелинейное дифференциальное уравнение первой степени вида

$$\frac{dY}{d\rho} = A(\rho) \cdot Y + B(\rho)$$

и решая его методом Бернули, получим общее решение:

$$\exp(e_\theta) = -\rho \int \frac{1}{\rho^2} \exp(2e_\theta - e_\rho) d\rho + C \rho.$$

Принимая во внимание граничные условия при  $\rho = R$ ,  $e_\theta = e_{\theta R} = \ln(R/R_0)$ , а также используя уравнения связи между напряжениями и деформациями (3) для несжимаемого материала, получим интегральное уравнение совместности логарифмических деформаций в напряжениях:

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_z + \sigma_\rho) + E_{\text{сек}} \ln \left( -\rho \int_R^\rho \frac{1}{\rho^2} \exp \left[ \frac{1}{E_{\text{сек}}} \left( \frac{5}{2} \sigma_\theta - 2\sigma_\rho - \frac{1}{2} \sigma_z \right) \right] d\rho + \frac{\rho}{R_0} \right),$$

или, учитывая, что для бесконечной трубы  $e_z = 0$  и, соответственно,  $\sigma_z = \frac{1}{2}(\sigma_\rho + \sigma_\theta)$ ,

$$\sigma_\theta = \sigma_\rho + \frac{4}{3} E_{\text{сек}} \ln \left( -\rho \int_R^\rho \frac{1}{\rho^2} \exp \left[ \frac{9}{4E_{\text{сек}}} (\sigma_\theta - \sigma_\rho) \right] d\rho + \frac{\rho}{R_0} \right). \quad (8)$$

Для определения  $\sigma_\rho$  используем уравнение равновесия (1). Интегрируя данное уравнение, принимая во внимание граничные условия при  $\rho = R$ ,  $\sigma_{\rho R} = 0$ , получаем интегральное уравнение равновесия:

$$\sigma_\rho = \int_R^\rho \frac{(\sigma_\theta - \sigma_\rho)}{\rho} d\rho. \quad (9)$$

Решение по определению напряжённо-деформированного состояния трубы в соответствии с методом переменных параметров упругости проводится методом последовательных приближений по рекуррентной схеме с использованием уравнений (8) и (9) для заданных граничных условий, т.е. при известном положении наружного края трубы  $R$  и радиальном напряжении на наружном крае  $\sigma_{\rho R} = 0$

$$\sigma_\theta^{(k+1)} = \sigma_\rho^{(k)} + \frac{4}{3} E_{\text{сек}}^{(k)} \ln \left( -\rho \int_R^\rho \frac{1}{\rho^2} \exp \left[ \frac{9}{4E_{\text{сек}}^{(k)}} (\sigma_\theta^{(k)} - \sigma_\rho^{(k)}) \right] d\rho + \frac{\rho}{R_0} \right);$$

$$\sigma_\rho^{(k+1)} = \int_R^\rho \frac{(\sigma_\theta^{(k+1)} - \sigma_\rho^{(k)})}{\rho} d\rho;$$

$$\sigma_z^{(k+1)} = \frac{1}{2}(\sigma_\rho^{(k+1)} + \sigma_\theta^{(k+1)}),$$

где величины с индексом  $(k)$  и  $(k+1)$  обозначают соответственно их значения в  $k$ -м и  $(k+1)$ -м приближениях. Численное интегрирование проводят от  $R$  до  $r^{(j)}$ , где  $r^{(j)}$  – внутренний радиус трубы в процессе деформирования. В нулевом приближении при  $j = 0$  считаем, что  $r^{(j)} = r_0$ , где  $r_0$  – внутренний радиус трубы в исходном состоянии без нагрузки.

Как показали вычисления, результаты расчётов не зависят от выбора значений исходного приближения для  $\sigma_\rho$ ,  $\sigma_\theta$  и  $\sigma_z$ , поэтому в исходном приближении принимаем

$$\sigma_\rho^{(0)} = 0, \sigma_\theta^{(0)} = 0, \sigma_z^{(0)} = 0, E_{\text{сек}}^{(0)} = E,$$

где  $E$  – модуль упругости материала, из которого изготовлена труба.

После определения напряжённого состояния находят деформированное состояние трубы, используя уравнения связи между напряжениями и деформациями (3).

Определив деформированное состояние, находят интенсивность напряжений и интенсивность деформаций (5) и уточняют значение  $E_{\text{сек}}$ , используя уравнение (6):

$$E_{\text{сек}}^{(k+1)} = \frac{A (e_i^{(k+1)})^n}{e_i^{(k+1)}}.$$

Для контроля сходимости процесса проводят сравнение значений интенсивностей напряжений:

$$\frac{\sigma_i^{(k+1)} - \sigma_i^{(k)}}{\sigma_i^{(k+1)}} 100\% \leq \Delta\sigma_i\%. \quad (10)$$

Расчёт продолжают до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность в процентах (10).

После достижения заданной точности расчёта напряжённо-деформированного состояния уточняют положение внутреннего края трубы:

$$r^{(j+1)} = r_0 \exp(e_{\theta r}^{(j)}),$$

где  $e_{\theta r}^{(j)}$  – значение тангенциальной логарифмической деформации на верхней границе численного интегрирования, т.е. при  $\rho = r^{(j)}$ .

После уточнения внутреннего радиуса трубы в процессе деформирования и изменения верхнего предела численного интегрирования, расчёт напряжённо-деформированного состояния повторяют до тех пор, пока не будет достигнута заданная точность определения внутреннего радиуса:

$$\frac{r^{(j+1)} - r^{(j)}}{r^{(j+1)}} 100\% \leq \Delta r\%.$$

После окончательного определения напряжённо-деформированного состояния можно найти внутреннее давление в трубе, при котором произошло заданное увеличение наружного радиуса трубы:

$$p = -\sigma_{\rho r},$$

где  $\sigma_{\rho r}$  – значение радиального напряжения на внутренней поверхности трубы в заключение всех расчётов.

Рассмотрим толстостенную сферическую оболочку. Для объёмного осесимметричного напряжённого состояния в сферической системе координат в случае центральной симметрии (равномерное давление внутри сферы) касательные напряжения отсутствуют, производные по  $\varphi$  равны нулю, а условия равновесия [1] будут иметь вид

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} [2\sigma_\rho - (\sigma_\varphi + \sigma_\theta)] = 0;$$

$$(\sigma_\varphi - \sigma_\theta) = 0,$$

или

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} = \frac{2(\sigma_\theta - \sigma_\rho)}{\rho}.$$

Можно показать, что условия совместности логарифмических деформаций в случае центральной симметрии можно представить в виде

$$\frac{de_\theta}{d\rho} = \frac{1 - \exp(e_\theta - e_\rho)}{\rho}; \quad (11)$$

$$(e_\varphi - e_\theta) = 0.$$

Решая дифференциальное уравнение системы (11) и учитывая условия равенства  $\sigma_\varphi$  и  $\sigma_\theta$ , можем получить интегральное уравнение условия совместности логарифмических деформаций в напряжениях для несжимаемого материала:

$$\sigma_\theta = \sigma_\rho + 2E_{\text{сек}} \ln \left( -\rho \int_R^\rho \frac{1}{\rho^2} \exp \left[ \frac{2}{E_{\text{сек}}} (\sigma_\theta - \sigma_\rho) \right] d\rho + \frac{\rho}{R_0} \right).$$

Интегральное уравнение равновесия записывается в виде

$$\sigma_\rho = \int_R^\rho \frac{2(\sigma_\theta - \sigma_\rho)}{\rho} d\rho.$$

Расчёт напряжённо-деформированного состояния толстостенной сферической оболочки и определение давления осуществляют в той же последовательности, что и в первом случае.

Чтобы найти несущую способность толстостенной оболочки, необходимо определить, когда давление достигает точки экстремума. Для этого необходимо выполнение условия

$$p = P_{\text{max}} \text{ при } dp = 0.$$

Таким образом, значение  $P_{\text{max}}$  определяет несущую способность толстостенной трубы.

Изменяя с определённым шагом наружный радиус  $R$  и определяя на каждом шаге давление  $p$ , можем построить график зависимости  $p$  от  $R$ . Анализируя полученный график, можно заметить, что в некоторый момент при увеличении наружного радиуса давление деформирования начинает падать, т.е. давление достигает максимума и приращение давления при увеличении радиуса становится меньше нуля:

$$dp < 0.$$

Это говорит о том, что наступил момент неустойчивого деформирования оболочки с последующим разрушением. Величина максимального давления в этом случае определяет несущую способность оболочки.

Как показали расчёты, несущая способность толстостенных оболочек, как цилиндрических, так и сферических, для конкретного материала зависит только от величины относительной толщины, определяемой как отношение исходной толщины к среднему радиусу оболочки в исходном состоянии:

$$\bar{h}_0 = \frac{h_0}{r_{\text{ср}0}} = \frac{h_0}{(R_0 + r_0)/2},$$

где  $h_0$  – исходная толщина оболочки;  $r_{cp0}$  – средний радиус оболочки в исходном состоянии;  $R_0$  – наружный радиус оболочки в исходном состоянии;  $r_0$  – внутренний радиус оболочки в исходном состоянии.

Поэтому все расчёты проводились для определённой относительной толщины оболочки.

Для сравнения результатов, полученных при определении несущей способности толсто-стенных осесимметричных оболочек, рассмотрим аналитические решения для аналогичных тонко-стенных оболочек.

Решение для тонкостенной цилиндрической оболочки бесконечной длины (стеснённой оболочки), нагруженной внутренним давлением, приведено Н. Н. Малининым [5]. В этом случае длина оболочки не меняется и напряжения определяются по формулам

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta} &= \frac{pr_{cp}}{h} \\ \sigma_z &= \frac{pr_{cp}}{2h} \\ \sigma_{\rho} &= 0 \end{aligned} \right\}.$$

Логарифмические тангенциальные (окружные), осевые и радиальные деформации, соответственно [5],

$$e_{\theta} = \ln \frac{r_{cp}}{r_{cp0}}; \quad e_z = 0; \quad e_{\rho} = \ln \frac{h}{h_0}.$$

Зависимость между давлением  $p$  и средним радиусом оболочки  $r_{cp}$  определяется выражением

$$p = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{h_0 r_{cp0}}{r_{cp}^2} A \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \frac{r_{cp}}{r_{cp0}} \right)^n, \quad (12)$$

а связь между толщиной оболочки и средним радиусом

$$h = h_0 \frac{r_{cp0}}{r_{cp}}. \quad (13)$$

Значение радиуса срединной поверхности тонкостенной цилиндрической оболочки бесконечной длины, при котором возникает потеря устойчивости и разрушение, равно

$$r_{cp \max} = r_{cp0} \exp \left( \frac{1}{2} n \right). \quad (14)$$

В этом случае максимально допустимое давление (несущую способность) такой тонкостенной цилиндрической оболочки бесконечной длины для конкретного материала можно определить формулой

$$P_{\max} = \frac{2A \overline{h_0}}{\sqrt{3} \left( \exp \left( \frac{1}{2} n \right) \right)^2} \left( \frac{1}{\sqrt{3}} n \right)^n, \quad (15)$$

где  $A$  и  $n$  – соответственно коэффициент и показатель степенной функции, аппроксимирующей диаграмму деформирования материала;  $\overline{h_0}$  – относительная толщина оболочки в исходном состоянии.

Для тонкостенной сферической оболочки, нагруженной внутренним давлением, тангенциальные (окружные), меридиональные и радиальные напряжения определяются как [5]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\theta} &= \frac{pr_{cp}}{h} \\ \sigma_{\varphi} &= \frac{pr_{cp}}{h} \\ \sigma_{\rho} &= 0 \end{aligned} \right\}.$$



Логарифмические тангенциальные (окружные), меридиональные и радиальные деформации соответственно [5]

$$e_{\theta} = \ln \frac{r_{cp}}{r_{cp0}}; e_{\varphi} = \ln \frac{r_{cp}}{r_{cp0}}; e_{\rho} = \ln \frac{h}{h_0}.$$

В этом случае зависимость между давлением  $p$  и средним радиусом сферической оболочки  $r_{cp}$  определяется выражением

$$p = \frac{2 h_0 r_{cp0}^2}{r_{cp}^3} A \left( 2 \ln \frac{r_{cp}}{r_{cp0}} \right)^n, \quad (16)$$

а связь между толщиной оболочки и средним радиусом

$$h = h_0 \left( \frac{r_{cp0}}{r_{cp}} \right)^2. \quad (17)$$

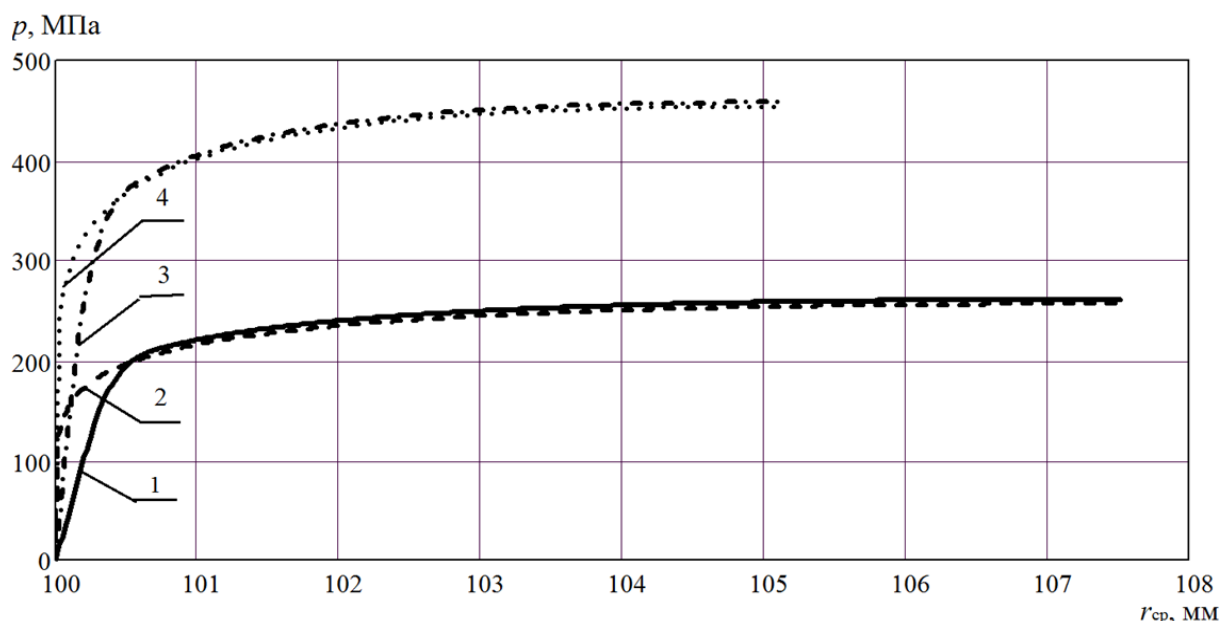
Значение радиуса срединной поверхности тонкостенной сферической оболочки, при котором возникает потеря устойчивости и разрушение, равно

$$r_{cp \max} = r_{cp0} \exp \left( \frac{1}{3} n \right). \quad (18)$$

Максимально допустимое давление (несущую способность) такой тонкостенной сферической оболочки для конкретного материала можно определить формулой

$$P_{\max} = \frac{2A \bar{h}_0}{\left( \exp \left( \frac{1}{3} n \right) \right)^3} \left( \frac{2}{3} n \right)^n. \quad (19)$$

На рис. 1 представлена зависимость между давлением  $p$  и средним радиусом  $r_{cp}$  для толсто-стенных оболочек, рассчитанная методом переменных параметров упругости (МППУ), и тонко-стенных оболочек, рассчитанная по формулам (12) и (16) при  $r_{cp0} = 100$  мм и  $h_0 = 50$  мм, для алюминиевого сплава 1163 (Д16чТ1) [6].



1 – толстостенная цилиндрическая оболочка (МППУ); 2 – тонкостенная цилиндрическая оболочка (формула (12)); 3 – толстостенная сферическая оболочка (МППУ); 4 – тонкостенная сферическая оболочка (формула (16))

Рис. 1. Зависимость между давлением  $p$  и средним радиусом оболочки  $r_{cp}$

Как показал сравнительный анализ численных расчётов методом переменных параметров упругости и по формулам, полученным аналитически, при относительной толщине оболочек  $h_0 = 0,5$  разница между результатами при определении несущей способности  $P_{\max}$  не превышает 1,5 %, а при определении толщины  $h$  – 0,5 %. Большое различие полученных значений давлений вначале нагружения объясняется тем, что при расчёте МППУ применялась линейно-степенная аппроксимация диаграммы деформирования, а при аналитических расчётах – степенная.

Таким образом, можно сделать вывод, что при расчёте больших деформаций и предельного состояния толстостенных оболочек, нагруженных внутренним давлением, можно с большой точностью использовать для цилиндрических оболочек формулы (12), (13), (14), (15), а для сферических – (16), (17), (18), (19). Важно отметить, что исследование напряжённо-деформированного состояния оболочек имеет большое значение в различных областях машиностроения, литейного производства, штамповке, что подтверждается исследованиями [7-11].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
2. Феоктистов, С. И. Автоматизация проектирования технологических процессов и оснастки заготовительно-штамповочного производства авиационной промышленности: монография / С. И. Феоктистов. – Владивосток: Дальнаука, 2001. – 183 с.
3. Биргер, И. А. Круглые пластинки и оболочки вращения / И. А. Биргер. – М.: Оборонгиз, 1961. – 358 с.
4. Биргер, И. А. Соппротивление материалов: учебное пособие / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 560 с.
5. Малинин, Н. Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н. Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1975. – 399 с.
6. Промышленные алюминиевые сплавы: справ. / С. Г. Алиев, М. Б. Альтман, С. М. Амбарцумян и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.
7. Математическое моделирование напряжённо-деформированного состояния монослойных электрофоретических оболочковых форм / А. И. Евстигнеев, В. И. Одинокоев, А. В. Свиридов, Э. А. Дмитриев, В. В. Петров // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № III-1 (35). – С. 66-72.
8. Петров, М. Р. Определение диаграммы растяжения трубчатого стержня из гиперэластичного материала / М. Р. Петров, А. Н. Петрова, С. Ф. Хакимов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № II-1 (34). – С. 29-34.
9. Исследование деформационно-технологических характеристик стали 12X18H10T / О. В. Башков, В. А. Ким, С. З. Лончаков, Р. А. Физулаков, И. В. Белова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № I-1 (37). – С. 77-83.
10. Растяжение сжимаемой полосы с непрерывным полем скоростей перемещений в условиях плоской деформации / И. В. Канахин, А. Л. Григорьева, А. И. Хромов, Я. Ю. Григорьев, В. А. Машевский // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III-1 (51). – С. 39-41.
11. Сысоев, О. Е. Исследование собственных колебаний и напряжённо-деформированного состояния замкнутого кольца при местном нагреве / О. Е. Сысоев, А. Ю. Добрышкин, С. Н. Нейн // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № II-1 (33). – С. 111-115.



Феоктистов С. И., Андрианов И. К.  
S. I. Feoktistov, I. K. Andrianov

**УРАВНЕНИЯ СОВМЕСТИМОСТИ ЛОГАРИФМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ  
В КООРДИНАТАХ ЭЙЛЕРА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ  
ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ**

**EQUATIONS OF JOINT LOGARITHMIC DEFORMATIONS IN EULER COORDINATES  
FOR SOLVING AXISYMMETRIC PRESSURE METAL PROCESSES**

**Феоктистов Сергей Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Авиационное» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: serg\_feo@mail.ru.

**Sergey I. Feoktistov** – Doctor of Engineering, Professor, Aircraft Industry Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin str., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: serg\_feo@mail.ru.

**Андрианов Иван Константинович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Общая физика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.

**Ivan K. Andrianov** – Phd in Engineering, Assistant Professor, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin str., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ivan\_andrianov\_90@mail.ru.

**Аннотация.** В работе рассмотрен вопрос вывода уравнений совместности логарифмических деформаций в координатах Эйлера для расчёта объёмного и плоского осесимметричного деформирования и для расчёта осесимметричных тонкостенных оболочек.

**Summary.** The paper considers the issue of derivation of compatibility equations of logarithmic deformations in Euler coordinates for the calculation of volumetric and plane axisymmetric deformation and for the calculation of axisymmetric thin-walled shells.

**Ключевые слова:** обработка металлов давлением, координаты Эйлера и Лагранжа, объёмное деформирование, тонкостенные оболочки.

**Key words:** pressure treatment of metals, Euler and Lagrange coordinates, volumetric deformation, thin-walled shells.

УДК 593.3

Основными уравнениями, определяющими напряжённо-деформированное состояние при решении упруго-пластических задач обработки металлов давлением, являются уравнения равновесия и условия совместности деформаций.

В случае решения плоской осесимметричной задачи уравнение равновесия имеет вид [1]

$$\frac{d\sigma_r}{d\rho} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{\rho}, \quad (1)$$

где  $\sigma_r$  и  $\sigma_\theta$  – соответственно радиальные и тангенциальные (окружные) напряжения;  $\rho$  – координата элемента заготовки, где определяется напряжённое состояние.

Для осесимметричного процесса формообразования радиальное перемещение элемента заготовки можно записать так:

$$u_r = \rho - r,$$

где  $r$  – координата элемента заготовки до деформации;  $\rho$  – координата элемента заготовки, куда она переместилась в процессе формообразования.

В этом случае относительные деформации определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_\rho &= \frac{du_\rho}{dr} = \frac{d\rho}{dr} - 1 \\ \varepsilon_\theta &= \frac{u_\rho}{r} = \frac{\rho}{r} - 1 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

а условие совместности относительных деформаций, соответственно,

$$\frac{d\varepsilon_\theta}{dr} = \frac{\varepsilon_\rho - \varepsilon_\theta}{r}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_\rho$  и  $\varepsilon_\theta$  – соответственно радиальные и тангенциальные (окружные) относительные деформации.

Если мы сравним уравнение (1) с уравнением (3), то заметим несоответствие между системами координат, в которых они записаны. На это обращает внимание Г. А. Смирнов-Аляев [2].

Объясняется это тем, что уравнение равновесия выводят по отношению к деформируемому телу, т.е. в координатах Эйлера (рассматривается точка пространства), а геометрические соотношения выводят по отношению к недеформированному телу, т.е. в координатах Лагранжа (рассматривается перемещение точки среды).

Для теории упругости и при малых упругопластических деформациях это несоответствие не учитывают, но при исследовании процессов обработки металлов давлением перемещения точек могут быть большими и совмещение координат Эйлера и Лагранжа может привести к значительным погрешностям.

Для решения данного противоречия, как правило, используют два подхода. Согласно первому варианту, в уравнениях равновесия переменные преобразуют с помощью замены, переходя от координат напряжённо-деформированного состояния к координатам начального состояния. Во втором подходе, оставляя классическую постановку статических уравнений равновесия, преобразуют геометрические соотношения, переходя к координатам деформированного тела. Оба подхода существенно усложняют математическую постановку задачи. Среди основных проблем можно отметить сложность задания граничных условий в координатах деформированного тела, если заданы размеры тела до деформации, а также проблему задания граничных статических условий в координатах тела до деформации в виду зависимости внешних сил от конфигурации тела в деформированном состоянии.

Следует отметить, что второй подход, связанный с преобразованием систем уравнений к координатам Эйлера, более удобен для решения обратных задач теории обработки давлением, когда при известных перемещениях точек тела рассчитываются требуемые усилия [3], в то время как первый подход – для решения прямых задач, когда при известных усилиях определяются перемещения, т.е. рассчитывается форма получаемой детали.

Проведённые в работах [4; 5] исследования показали, что использование координат Эйлера при больших деформациях и перемещениях весьма эффективно. При этом изделия оболочечного типа широко используются при решении технических задач литья, посадки, колебаний, что отражено в трудах [6–10].

Выведем уравнение совместности логарифмических деформаций в координатах Эйлера для объёмного и плоского осесимметричного деформированного состояния.

Используя уравнения (1), получим

$$dr = \frac{d\rho}{\varepsilon_\rho + 1};$$



$$r = \frac{\rho}{\varepsilon_\theta + 1}.$$

Подставляя полученные выражения в (3), можно получить уравнение совместности относительных деформаций в координатах Эйлера:

$$\frac{d\varepsilon_\theta}{d\rho} = \frac{(\varepsilon_\rho - \varepsilon_\theta)(\varepsilon_\rho + 1)}{\rho(\varepsilon_\theta + 1)}.$$

Согласно определению логарифмических деформаций [1] и используя выражения (2), имеем

$$\left. \begin{aligned} e_\rho &= \ln(\varepsilon_\rho + 1) = \ln\left(\frac{d\rho}{dr}\right) \\ e_\theta &= \ln(\varepsilon_\theta + 1) = \ln\left(\frac{\rho}{r}\right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Заменяя в выражении (3) относительные деформации логарифмическими (4), окончательно получим уравнение совместности логарифмических деформаций в координатах Эйлера для объёмного и плоского осесимметричного деформированного состояния:

$$\frac{de_\theta}{d\rho} = \frac{1 - \exp(e_\theta - e_\rho)}{\rho}, \quad (5)$$

где  $e_\rho$  и  $e_\theta$  – соответственно радиальные и тангенциальные (окружные) логарифмические деформации, определяемые выражениями (4).

Уравнение (5) можно использовать и для расчётов в сферической системе координат при условии центральной симметрии.

Рассмотрим деформацию элементов тонкостенной осесимметричной оболочки в процессе формообразования.

Согласно рис. 1, в цилиндрической системе координат имеем следующие соотношения:

$$\begin{aligned} dl_{m0} &= \frac{dr}{\cos \varphi_0}, & dl_m &= \frac{d\rho}{\cos \varphi}; \\ dl_{\theta 0} &= r d\theta, & dl_\theta &= \rho d\theta, \end{aligned}$$

где  $dl_{m0}$  и  $dl_m$  – соответственно длина рассматриваемого элемента в меридиональном направлении до и в процессе формообразования;  $dl_{\theta 0}$  и  $dl_\theta$  – соответственно длина рассматриваемого элемента в тангенциальном (окружном) направлении до и в процессе формообразования;  $\varphi_0$  и  $\varphi$  – угол между касательной к рассматриваемому элементу оболочки в меридиональном сечении и горизонталью до и в процессе формообразования соответственно;  $\theta$  – угол, определяющий положение рассматриваемого элемента по окружности в цилиндрической системе координат.

Таким образом, относительные деформации в цилиндрической системе координат определяются следующими соотношениями:

- меридиональные относительные деформации

$$\varepsilon_m = \frac{dl_m - dl_{m0}}{dl_{m0}} = \frac{d\rho \cos \varphi_0}{dr \cos \varphi} - 1;$$

- тангенциальные (окружные) относительные деформации

$$\varepsilon_\theta = \frac{dl_\theta - dl_{\theta 0}}{dl_{\theta 0}} = \frac{\rho}{r} - 1.$$

Принимая во внимание уравнения связи между логарифмическими и относительными деформациями [1], получим выражения для логарифмических деформаций:

$$\left. \begin{aligned} e_m &= \ln(\varepsilon_m + 1) = \ln \left( \frac{d\rho \cos \varphi_0}{dr \cos \varphi} \right) \\ e_\theta &= \ln(\varepsilon_\theta + 1) = \ln \left( \frac{\rho}{r} \right) \end{aligned} \right\}$$

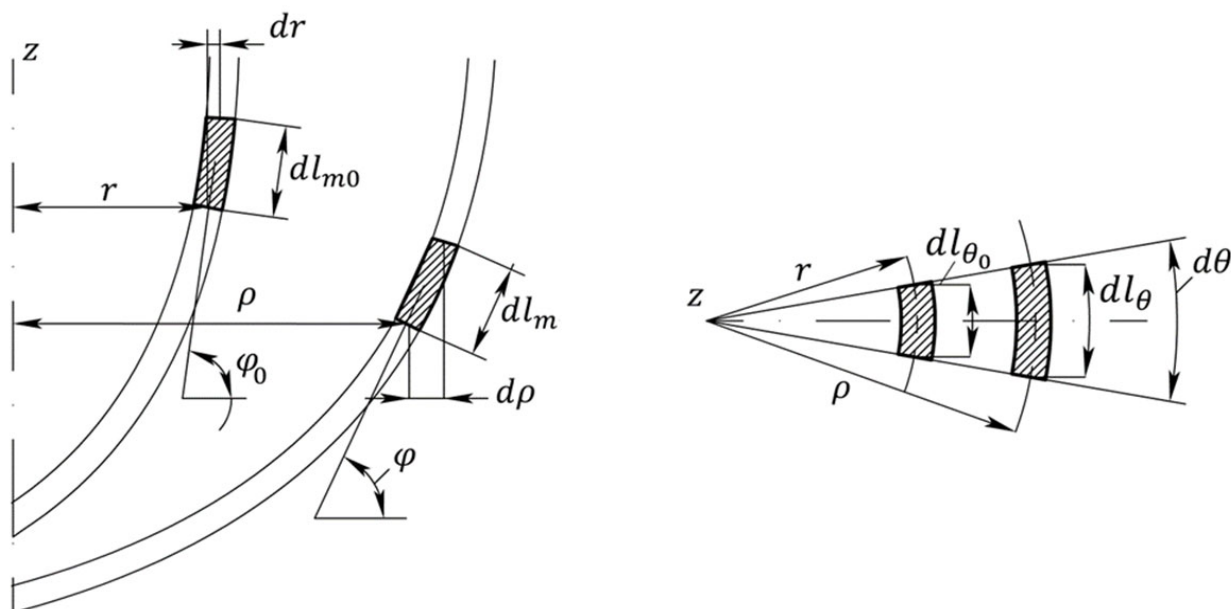


Рис. 1. Деформация элемента тонкостенной оболочки в меридиональном и тангенциальном (окружном) направлениях

В этом случае уравнение совместности логарифмических деформаций в координатах Эйлера для тонкостенных осесимметричных оболочек в цилиндрической системе координат запишется в виде

$$\frac{de_\theta}{d\rho} = \frac{1 - \frac{\cos \varphi_0}{\cos \varphi} \exp(e_\theta - e_m)}{\rho}, \quad (6)$$

где  $e_\theta$  – тангенциальные (окружные) логарифмические деформации;  $e_m$  – меридиональные логарифмические деформации;  $\varphi_0$  и  $\varphi$  – угол между касательной к рассматриваемому элементу оболочки в меридиональном сечении и горизонталью до деформирования и в процессе формообразования соответственно.

Таким образом, получены уравнения совместности логарифмических деформаций в координатах Эйлера для объёмного и плоского осесимметричного деформированного состояния (5), а также для тонкостенных осесимметричных оболочек в цилиндрической системе координат (6).

Использование этих уравнений позволит значительно уменьшить погрешности расчётов при анализе широкого ряда процессов обработки металлов давлением.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.
2. Смирнов-Аляев, Г. А. Теория пластических деформаций металлов. Механика конечного формоизменения / Г. А. Смирнов-Аляев, В. М. Розенберг. – Л.: Машгиз, 1956. – 367 с.
3. Чумадин, А. С. Теория и расчёт процессов листовой штамповки (для инженеров) / А. С. Чумадин. – 2-е изд. – М.: Экспосервис «ВИП», 2014. – 216 с.



4. Дуйшеналиев, Т. Б. Градиенты перемещения в координатах Лагранжа и Эйлера / Т. Б. Дуйшеналиев, А. С. Дуйшембиев // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2018. – № 2 (46). – С. 36-39.
5. Агапов, М. С. Численное решение задачи сильного нелинейного деформирования в координатах Эйлера / М. С. Агапов, Е. Б. Кузнецов, В. И. Шалашилин // Учёные записки Казанского государственного университета. Серия: Физико-математические науки. – 2007. – Т. 149. – № 4. – С. 45-57.
6. Бормотин, К. С. Численный метод оптимизации кинематической схемы формообразования панелей двойной кривизны / К. С. Бормотин, К. Е. Герасимов, М. И. Романютин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 59-69.
7. Отряскина, Т. А. Исследование деформационных процессов при трении / Т. А. Отряскина, М. В. Хортик // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 104-109.
8. Пицык, В. С. Исследование структуры и свойств физического контакта неразъёмного соединения, созданного холодной тугой посадкой вала во втулку из сплава ОТ4-1 / В. С. Пицык, Э. А. Дмитриев, В. И. Муравьев // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № I-1 (49). – С. 69-75.
9. Разработка новых структур многослойных оболочковых форм по выплавляемым моделям / А. И. Евстигнеев, Э. А. Дмитриев, В. И. Одионов, Е. П. Иванкова, Г. И. Усанов, В. В. Петров // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 104-107.
10. Сысоев, О. Е. Исследование собственных колебаний и напряжённо-деформированного состояния замкнутого кольца при местном нагреве / О. Е. Сысоев, А. Ю. Добрышкин, С. Н. Нейн // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № I-1 (33). – С. 34-38.

Бердонос В. Д., Недиков И. О., Шамак В. А., Светлаков А. А.  
ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ  
ОПТИМИЗАЦИИ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА РОЯ ПЧЁЛ

Бердонос В. Д., Недиков И. О., Шамак В. А., Светлаков А. А.  
V. D. Berdonosov, I. O. Nedikov, V. A. Shamak, A. A. Svetlakov

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА РОЯ ПЧЁЛ

### SOFTWARE FOR PRELIMINARY PARAMETRIC OPTIMIZATION OF HYBRID POWER SYSTEMS BASED ON THE BEE SWARM ALGORITHM

**Бердонос Виктор Дмитриевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная математика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: berd1946@gmail.com.

**Victor D. Berdonosov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Applied Mathematics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: berd1946@gmail.com.

**Недиков Илья Олегович** – студент Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: ilyandkv@gmail.com.

**Илья О. Nedikov** – Student, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (Russia, Saint Petersburg). E-mail: ilyandkv@gmail.com.

**Шамак Виктория Александровна** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: shamak.va@mail.ru.

**Victoria A. Shamak** – a Post-graduate, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: shamak.va@mail.ru.

**Светлаков Анатолий Антонович** – доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Россия, Томск). E-mail: office@kcup.tusur.ru.

**Anatolii A. Svetlakov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computer Systems in Control and Design, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Russia, Tomsk). E-mail: office@kcup.tusur.ru.

**Аннотация.** В статье представлена методика предварительной параметрической оптимизации автономной гибридной энергетической системы, состоящей из четырёх этапов. Также приведено описание программного обеспечения для выполнения представленной методики. Программный комплекс состоит из следующих компонентов: пользовательского интерфейса, географического информационного модуля, вычислительного и оптимизационного модулей. Для хранения параметров оборудования, а также информации о поселениях используется база данных, которая взаимодействует с программой.

**Summary.** The article presents a methodology for preliminary parametric optimization of an autonomous hybrid energy system, consisting of four stages. The description of the software for performing the presented methodology is also given. The software package consists of the following components: user interface, geographic information module, computational and optimization modules. To store the parameters of the equipment, as well as information about the settlements, a database is used that interacts with the program.

**Ключевые слова:** солнечная энергия, ветровая энергия, автономные гибридные электростанции, накопители, математическая модель, оптимизация, программный комплекс.

**Key words:** solar energy, wind energy, autonomous hybrid power plants, storage devices, mathematical model, optimization, software package.



УДК 004.9

### **Введение**

Почти каждый месяц появляется информация о новых достижениях в области систем, использующих солнечную и/или ветровую энергии [1; 2]. Тем не менее гибридная энергетика развивается умеренными темпами. С одной стороны, многие страны, например Германия, Испания, Италия, Австралия, год от года увеличивают объём энергии, получаемой от возобновляемых источников [3]. С другой стороны, стоимость единицы энергии от возобновляемых источников продолжает оставаться выше, чем аналогичная стоимость от традиционных источников [4; 5]. По этой причине гибридная энергетика, как правило, дотационная. В России с её огромными территориями, не охваченными централизованным электроснабжением, ситуация несколько иная. Так как стоимость единицы энергии в автономных посёлках, не связанных общероссийской энергосистемой, в несколько раз превышает стоимость в поселениях, включённых в общую энергосистему, то использование в плане экономики выглядит более предпочтительно. Для оценки целесообразности использования гибридной энергетики в автономных поселениях первоначально следует провести предварительные расчёты потребности и стоимости основных компонентов системы автономных гибридных электростанций (АГЭС). Кроме того, необходимо определиться с зависимостью этих параметров от динамики потоков солнечной и ветровой энергий, а также от характера изменения потока потребления в течение нескольких лет. В работе в качестве примера рассматривается методика и результаты данного подхода применительно к автономным поселениям Хабаровского края.

### **Постановка задачи предварительной параметрической оптимизации АГЭС**

Для предварительной оптимизации рассматривается следующее оборудование, формирующее АГЭС: солнечные и ветрогенераторы, а также накопители энергии. Обслуживающее оборудование (преобразователи, кабели, коннекторы и т. д.) в предварительную оптимизацию не включаются из-за их относительно небольшого процента участия в стоимости, который может быть учтён соответствующим коэффициентом. Для предварительного расчёта варьировалось количество солнечных и ветрогенераторов, а также количество накопителей. Всё оборудование, включённое в расчёт, выпускается промышленно и доступно для приобретения в России. Кроме количественных и качественных характеристик оборудования использовалась информация о поступающих потоках энергии солнца и ветра, входных-выходных потоках накопителей, а также информация о потоке потребления. Во многих работах [6; 7; 8] для расчётов используются среднегодовые значения этих потоков, что вносит значительные погрешности в эти расчёты, понижая их достоверность. Погрешность в первую очередь связана с существенной динамикой этих потоков. В общем виде динамика может быть: погодной, помесечной, подневной, почасовой, поминутной и т. д. Очевидно, чем более «мелкая» динамика используется, тем ближе к реальности полученные результаты. Однако использование «мелкой» динамики повышает как трудоёмкость получения исходных данных, так и сложность расчётов. Так, если для получения погодных потоков достаточно получить информацию на сайте ГИС ВИЭ [9], то для подневных потоков уже потребуется информация с сайтов, размещающих дневники [10], с последующей нормализацией. Если при построении трёхгодичного погодного графика достаточно провести расчёты для трёх точек, то для почасового графика понадобятся расчёты уже для 26 280 точек, и это только без оптимизации. По этой причине актуальна задача оценки предпочтительной дискретизации динамики. Ясно, что погодная и помесечная дискретизации недостаточны хотя бы по той причине, что в этих случаях нет возможности учесть роль накопителей [11; 12]. Таким образом, стоит задача выбрать и обосновать этот выбор между подневной и почасовой дискретизацией.

### **Методика предварительной параметрической оптимизации АГЭС**

Методика включает четыре основных этапа:

1. Задание начального качественного и количественного состава оборудования АГЭС и степени дискретизации.
2. Расчёт энергетических балансов по заданным параметрам.
3. Расчёт, накопление и анализ стоимости оборудования для количественного состава оборудования.



4. Вариация количественного состава по результатам анализа в предыдущем пункте и переход, в случае необходимости, к расчёту энергетических балансов.

Этап 1 – задание начального качественного и количественного состава оборудования АГЭС и степени дискретизации – производится на основе имеющегося опыта.

Этап 2 – расчёт энергетических балансов по заданным параметрам – производится в соответствии с нижеприведёнными выражениями.

Погодовой энергетический баланс определяется в соответствии с выражением

$$\text{Sun\_Out}^{\text{Year}}(\text{vill}, N_{\text{sun}}, \text{Mod}_{\text{sun}}) + \text{Wind\_Out}^{\text{Year}}(\text{vill}, N_{\text{wind}}, \text{Mod}_{\text{wind}}) > \text{Load}^{\text{Year}}(\text{vill}),$$

где  $\text{Sun\_Out}^{\text{Year}}(\text{vill}, N_{\text{sun}}, \text{Mod}_{\text{sun}})$  – суммарная за год величина энергии на выходе  $N_{\text{sun}}$  солнечных модулей (панелей) типа  $\text{Mod}_{\text{sun}}$ , равная

$$\text{Sun\_Out}^{\text{Year}}(\text{vill}, N_{\text{sun}}, \text{Mod}_{\text{sun}}) = \text{Sun\_In}^{\text{Year}}(\text{vill}) \cdot S(\text{Mod}_{\text{sun}}) \cdot \text{Mod\_eff}(\text{Mod}_{\text{sun}}) \cdot N_{\text{sun}}(\text{Mod}_{\text{sun}}),$$

здесь  $\text{Sun\_In}^{\text{Year}}(\text{vill})$  – солнечная радиация за год, усреднённая по площади ( $\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2 \cdot \text{год}$ ) для конкретного посёлка ( $\text{vill}$ );

$S(\text{Mod}_{\text{sun}})$ ,  $\text{Mod\_eff}(\text{Mod}_{\text{sun}})$ ,  $N_{\text{sun}}(\text{Mod}_{\text{sun}})$  – соответственно площадь, эффективность и количество солнечных панелей, используемых в АГЭС;

$\text{Wind\_Out}^{\text{Year}}(\text{vill}, N_{\text{wind}}, \text{Mod}_{\text{wind}})$  – суммарная за год величина энергии на выходе  $N_{\text{wind}}$  ветрогенераторов типа  $\text{Mod}_{\text{wind}}$ , равная

$$\text{Wind\_Out}^{\text{Year}}(\text{vill}, N_{\text{wind}}, \text{Mod}_{\text{wind}}) = \text{Wind\_In}(\text{vill}) \cdot N(\text{Mod}_{\text{wind}}) \cdot S(\text{Mod}_{\text{wind}}) \cdot \text{Mod\_eff}(\text{Mod}_{\text{wind}}) \cdot N_{\text{hour}}^{\text{Year}},$$

здесь  $\text{Wind\_In}(\text{vill})$  – среднегодовая плотность мощности ветрового потока (на высоте 30 метров) ( $\text{кВт} / \text{м}^2$ );

$S(\text{Mod}_{\text{wind}})$ ,  $\text{Mod\_eff}(\text{Mod}_{\text{wind}})$ ,  $N(\text{Mod}_{\text{wind}})$  – соответственно площадь относительно потока ветра, эффективность и количество ветрогенераторов, используемых в АГЭС;

$N_{\text{hour}}^{\text{Year}}$  – число часов в году;

$\text{Load}^{\text{Year}}(\text{vill})$  – энергопотребление за год конкретным посёлком ( $\text{vill}$ ).

Помесячный годовой энергетический баланс определяется в соответствии с выражением

$$\forall i \in I, \text{Batt}^{\text{Month}}(\text{vill}, N_{\text{batt}}, \text{Mod}_{\text{batt}})_i > \text{Load}^{\text{Month}}(\text{vill})_i,$$

где  $i$  – номер месяца в периоде исследования;

$I$  – массив номеров месяцев, не менее двенадцати и, как правило, не больше тридцати шести;

$\text{Batt}^{\text{Month}}(\text{vill}, N_{\text{batt}}, \text{Mod}_{\text{batt}})_i$  – суммарная, за  $i$ -й месяц, величина энергии, накопленной в аккумуляторах, равная

$$\text{Batt}^{\text{Month}}(\text{vill}, N_{\text{batt}}, \text{Mod}_{\text{batt}})_i = \text{Batt}^{\text{Month}}(\text{vill}, N_{\text{batt}}, \text{Mod}_{\text{batt}})_{i-1} + \text{Sun\_Out}^{\text{Month}}(\text{vill}, N_{\text{sun}}, \text{Mod}_{\text{sun}})_i + \\ + \text{Wind\_Out}^{\text{Month}}(\text{vill}, N_{\text{wind}}, \text{Mod}_{\text{wind}})_i - \text{Load}^{\text{Month}}(\text{vill})_i,$$

здесь  $\text{Sun\_Out}^{\text{Month}}(\text{vill}, N_{\text{sun}}, \text{Mod}_{\text{sun}})_i$  – суммарная за  $i$ -й месяц величина энергии на выходе  $N_{\text{sun}}$  солнечных модулей (панелей) типа  $\text{Mod}_{\text{sun}}$ , равная

$$\text{Sun\_Out}^{\text{Month}}(\text{vill}, N_{\text{sun}}, \text{Mod}_{\text{sun}})_i = \text{Sun\_In}^{\text{Month}}(\text{vill})_i \cdot S(\text{Mod}_{\text{sun}}) \cdot \text{Mod\_eff}(\text{Mod}_{\text{sun}}) \cdot N_{\text{sun}}(\text{Mod}_{\text{sun}}),$$

здесь  $\text{Sun\_In}^{\text{Month}}(\text{vill})_i$  – солнечная радиация за  $i$ -й месяц, усреднённая по площади ( $\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2 \cdot \text{месяц}$ ) для конкретного посёлка ( $\text{vill}$ );

$\text{Wind\_Out}^{\text{Month}}(\text{vill}, N_{\text{wind}}, \text{Mod}_{\text{wind}})_i$  – суммарная за  $i$ -й месяц величина энергии на выходе  $N_{\text{wind}}$  ветрогенераторов типа  $\text{Mod}_{\text{wind}}$ , равная

$$\text{Wind\_Out}^{\text{Month}}(\text{vill}, N_{\text{wind}}, \text{Mod}_{\text{wind}})_i = \text{Wind\_In}(\text{vill})_i \cdot N(\text{Mod}_{\text{wind}}) \cdot S(\text{Mod}_{\text{wind}}) \cdot \text{Mod\_eff}(\text{Mod}_{\text{wind}}) \times \\ \times N_{\text{hour}}^{\text{Month}}_i,$$

здесь  $\text{Wind\_In}(\text{vill})_i$  – среднемесячная для  $i$ -го месяца плотность мощности ветрового потока (на высоте 30 метров) ( $\text{кВт} / \text{м}^2$ );

$N_{\text{hour}}^{\text{Month}}_i$  – число часов в  $i$ -м месяце;

$\text{Load}^{\text{Month}}(\text{vill})_i$  – среднемесячное для  $i$ -го месяца энергопотребление конкретным посёлком ( $\text{vill}$ ).

Подневной годовой энергетический баланс определяется в соответствии с выражением

$$\forall j \in J, \text{Batt}^{\text{Day}}(\text{vill}, N_{\text{batt}}, \text{Mod}_{\text{batt}})_j > \text{Load}^{\text{Day}}(\text{vill})_j,$$

где  $j$  – номер дня за период исследования;

$J$  – массив номеров дней, не менее 365 дней и, как правило, не больше 1065;

$\text{Batt}^{\text{Day}}(\text{vill}, N_{\text{batt}}, \text{Mod}_{\text{batt}})_j$  – суммарная за  $j$ -й день величина энергии накопленной в аккумуляторах, равная

$$\text{Batt}^{\text{Day}}(\text{vill}, N_{\text{batt}}, \text{Mod}_{\text{batt}})_j = \text{Batt}^{\text{Day}}(\text{vill}, N_{\text{batt}}, \text{Mod}_{\text{batt}})_{j-1} + \text{Sun\_Out}^{\text{Day}}(\text{vill}, N_{\text{sun}}, \text{Mod}_{\text{sun}})_j + \\ + \text{Wind\_Out}^{\text{Day}}(\text{vill}, N_{\text{wind}}, \text{Mod}_{\text{wind}})_j - \text{Load}^{\text{Day}}(\text{vill})_j;$$

здесь  $\text{Sun\_Out}^{\text{Day}}(\text{vill}, N_{\text{sun}}, \text{Mod}_{\text{sun}})_j$  – суммарная за  $j$ -й день величина энергии на выходе  $N_{\text{sun}}$  солнечных модулей (панелей) типа  $\text{Mod}_{\text{sun}}$ , равная

$$\text{Sun\_Out}^{\text{Day}}(\text{vill}, N_{\text{sun}}, \text{Mod}_{\text{sun}})_j = \text{Sun\_In}^{\text{Day}}(\text{vill})_j \cdot S(\text{Mod}_{\text{sun}}) \cdot \text{Mod\_eff}(\text{Mod}_{\text{sun}}) \cdot N_{\text{sun}}(\text{Mod}_{\text{sun}}),$$

здесь  $\text{Sun\_In}^{\text{Day}}(\text{vill})_j$  – солнечная радиация за  $j$ -й день, усреднённая по площади ( $\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2 \cdot \text{день}$ ) для конкретного посёлка ( $\text{vill}$ );

$\text{Wind\_Out}^{\text{Day}}(\text{vill}, N_{\text{wind}}, \text{Mod}_{\text{wind}})_j$  – суммарная за  $j$ -й день величина энергии на выходе  $N_{\text{wind}}$  ветрогенераторов типа  $\text{Mod}_{\text{wind}}$ , равная

$$\text{Wind\_Out}^{\text{Day}}(\text{vill}, N_{\text{wind}}, \text{Mod}_{\text{wind}})_j = \text{Wind\_In}(\text{vill})_j \cdot N(\text{Mod}_{\text{wind}}) \cdot S(\text{Mod}_{\text{wind}}) \cdot \text{Mod\_eff}(\text{Mod}_{\text{wind}}) \cdot N_{\text{hour}}^{\text{Day}}_j,$$

здесь  $\text{Wind\_In}(\text{vill})_j$  – среднедневная для  $j$ -го дня плотность мощности ветрового потока (на высоте 30 метров),  $\text{кВт} / \text{м}^2$ ;

$N_{\text{hour}}^{\text{Day}}_j$  – число часов в  $i$ -м дне;

$\text{Load}^{\text{Day}}(\text{vill})_j$  – среднедневное для  $j$ -го дня энергопотребление конкретным посёлком ( $\text{vill}$ ).

Почасовой годовой энергетический баланс определяется в соответствии с выражением

$$\forall k \in K, \text{Batt}^{\text{Hour}}(\text{vill}, N_{\text{batt}}, \text{Mod}_{\text{batt}})_k > \text{Load}^{\text{Hour}}(\text{vill})_k,$$

где  $k$  – номер часа за период исследования;

$K$  – массив номеров часов, не менее 8760 часов и, как правило, не больше 25 560;

$\text{Batt}^{\text{Hour}}(\text{vill}, N_{\text{batt}}, \text{Mod}_{\text{batt}})_k$  – суммарная за  $k$ -й час величина энергии, накопленной в аккумуляторах, равная

$$\text{Batt}^{\text{Hour}}(\text{vill}, N_{\text{batt}}, \text{Mod}_{\text{batt}})_k = \text{Batt}^{\text{Hour}}(\text{vill}, N_{\text{batt}}, \text{Mod}_{\text{batt}})_{k-1} + \text{Sun\_Out}^{\text{Hour}}(\text{vill}, N_{\text{sun}}, \text{Mod}_{\text{sun}})_k + \\ + \text{Wind\_Out}^{\text{Hour}}(\text{vill}, N_{\text{wind}}, \text{Mod}_{\text{wind}})_k - \text{Load}^{\text{Hour}}(\text{vill})_k,$$

здесь  $\text{Sun\_Out}^{\text{Hour}}(\text{vill}, N_{\text{sun}}, \text{Mod}_{\text{sun}})_k$  – суммарная за  $k$ -й час величина энергии на выходе  $N_{\text{sun}}$  солнечных модулей (панелей) типа  $\text{Mod}_{\text{sun}}$ , равная

$$\text{Sun\_Out}^{\text{Hour}}(\text{vill}, N_{\text{sun}}, \text{Mod}_{\text{sun}})_k = \text{Sun\_In}^{\text{Hour}}(\text{vill})_k \cdot S(\text{Mod}_{\text{sun}}) \cdot \text{Mod\_eff}(\text{Mod}_{\text{sun}}) \cdot N_{\text{sun}}(\text{Mod}_{\text{sun}}),$$

здесь  $\text{Sun\_In}^{\text{Hour}}(\text{vill})_k$  – солнечная радиация за  $k$ -й час, усреднённая по площади ( $\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2 \cdot \text{час}$ ) для конкретного посёлка ( $\text{vill}$ );

$\text{Wind\_Out}^{\text{Hour}}(\text{vill}, N_{\text{wind}}, \text{Mod}_{\text{wind}})_k$  – суммарная за  $k$ -й час величина энергии на выходе  $N_{\text{wind}}$  ветрогенераторов типа  $\text{Mod}_{\text{wind}}$ , равная

$$\text{Wind\_Out}^{\text{Hour}}(\text{vill}, N_{\text{wind}}, \text{Mod}_{\text{wind}})_k = \text{Wind\_In}(\text{vill})_k \cdot N(\text{Mod}_{\text{wind}}) \cdot S(\text{Mod}_{\text{wind}}) \cdot \text{Mod\_eff}(\text{Mod}_{\text{wind}}),$$

здесь  $\text{Wind\_In}(\text{vill})_k$  – среднечасовая для  $k$ -го часа плотность мощности ветрового потока (на высоте 30 метров),  $\text{кВт} / \text{м}^2$ ;

$\text{Load}^{\text{Hour}}(\text{vill})_k$  – среднечасовое для  $k$ -го часа энергопотребление конкретным посёлком ( $\text{vill}$ ).

Этап 3 – расчёт стоимости оборудования независимо от дискретности исследований – производится в соответствии со следующим выражением:

$$\text{Cost}_{\text{total}} = \text{Cost}_{\text{sun}} + \text{Cost}_{\text{wind}} + \text{Cost}_{\text{batt}},$$

где  $\text{Cost}_{\text{total}}$  – общая стоимость оборудования;

$Cost_{sun} = Cost_{sun}(Mod_{sun}) \cdot N_{sun}$  – стоимость солнечных модулей;  
здесь  $Cost_{sun}(Mod_{sun})$  – стоимость солнечного модуля типа  $Mod_{sun}$ ;  
 $Cost_{wind} = Cost_{wind}(Mod_{wind}) \cdot N_{wind}$  – стоимость ветрогенераторов,  
здесь  $Cost_{wind}(Mod_{wind})$  – стоимость ветрогенератора типа  $Mod_{wind}$ ;  
 $Cost_{batt} = Cost_{batt}(Mod_{batt}) \cdot N_{batt}$  – стоимость аккумуляторов,  
здесь  $Cost_{batt}(Mod_{batt})$  – стоимость аккумулятора типа  $Mod_{batt}$ .

Накопление и анализ производятся для реализации вариации параметров с целью минимизации общей стоимости оборудования ( $Cost_{total}$ ).

Этап 4 – вариация количественного состава по результатам анализа этапа 3 и переход, если минимум  $Cost_{total}$  не достигнут, к расчёту энергетических балансов с обновлёнными параметрами.

### Программное обеспечение предварительной параметрической оптимизации АГЭС

Программное обеспечение Energy Device Calculator (EDC), предназначенное для предварительной параметрической оптимизации автономных гибридных энергетических систем, разработано на языке программирования C# с использованием технологии ASP.NET Core и паттерна программирования MVC. Выбранный подход делает программу кроссплатформенной, устойчивой к ошибкам, связанным с контролем сборки мусора, задаёт высокий уровень безопасности к различным типам удалённых нежелательных атак и позволяет легко дополнять функционал без опасности нарушить работу ранее реализованной логики.

Взаимодействие программы с базой данных реализовано с использованием Entity Framework Core 3.1.4, что позволило решить проблему совместимости и дальнейшего сопровождения. Сама база данных является автоматически сгенерированной из объектов расчётной модели и поддерживает возможность обновлений с помощью автоматически сгенерированных миграций на основе изменений расчётной модели.

Для удобства работы с системой реализован визуальный геоинформационный модуль на основе API 2GIS. Модуль позволяет выполнять отбор населённого пункта для расчёта посредством простого выбора на актуальной географической карте.

На рис. 1 представлена диаграмма взаимодействия компонентов платформы Energy Device Calculator.

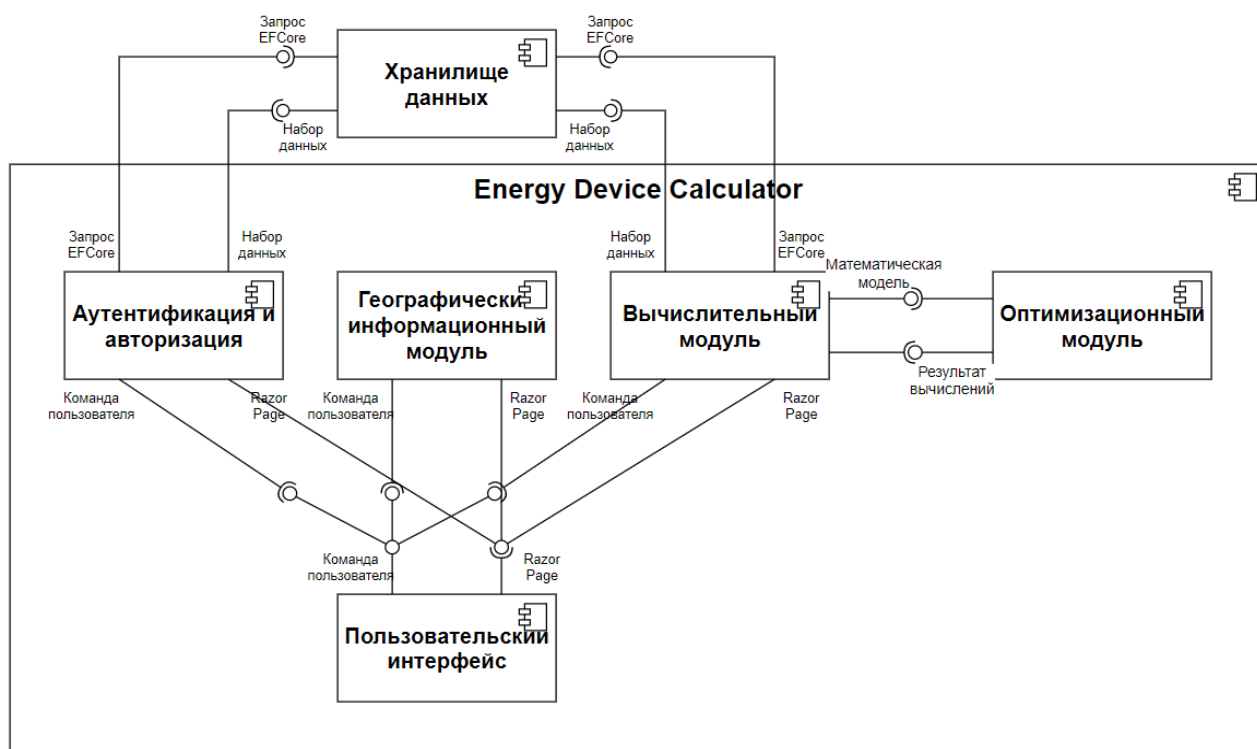


Рис. 1. Диаграмма компонентов Energy Device Calculator

### **Пользовательский интерфейс**

Программа выполнения оформлена в виде веб-приложения, а всё взаимодействие с внутренней логикой происходит посредством веб-страниц. Для разработки веб-страниц использовался механизм Razor Page, позволяющий легко встраивать динамические элементы в страницы. Имеется защищённая область веб-сайта, для доступа к которой необходимо пройти процедуру авторизации.

На главной странице для удобства восприятия хранимой информации представлен геоинформационный модуль, на котором располагаются все доступные для расчётов населённые пункты. На странице «Исследования» имеется возможность выбирать тип интересующих результатов данных и вводить стартовые параметры при запуске расчётов.

Страница «База данных» является переходной к страницам управления таблицами хранилища данных. На страницах «Посёлки», «Солнечные панели», «Ветрогенераторы», «Аккумуляторы» можно добавлять, изменять и удалять соответствующие объекты. Доступные для хранения характеристики объектов представлены в разделе «Хранилище данных». Страница «Авторизация» предназначена для аутентификации и присвоения прав доступа пользователю. На странице «Контакты» предоставлены контактные данные всех лиц, участвующих в исследовании.

### **Географический информационный модуль**

Географический модуль выполнен с использованием 2GIS API, являющегося свободно распространяемым программным обеспечением. Данный модуль даёт возможность быстро и легко выполнить расчёт по интересующему населённому пункту при помощи простого клика по метке на карте (см. рис. 2). Данные для меток берутся из таблицы с населёнными пунктами базы данных.

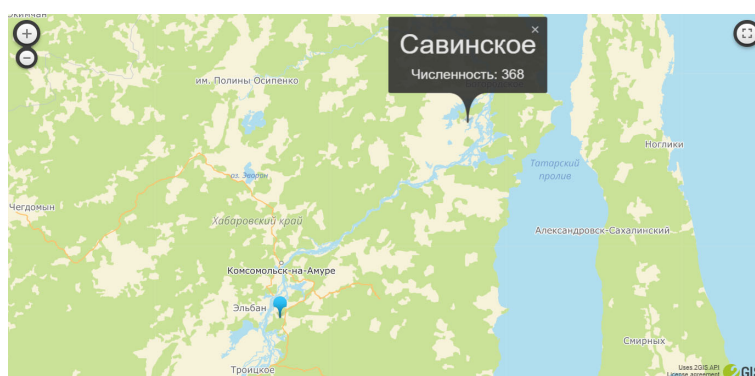


Рис. 2. Интерфейс геоинформационного модуля

### **Вычислительный модуль**

Расчёт выполняется согласно методике предварительной параметрической оптимизации АГЭС, подробно описанной выше.

### **Оптимизационный модуль**

Экономическая оптимизация гибридной энергетической системы основана на целевой функции, минимизирующей стоимость конфигурации системы, учитывающей ограничения по непрерывному обеспечению потребностей потребителей. В этом контексте на рис. 3 представлена блок-схема оптимизации целевой функции методом «рой пчёл».

На вход алгоритма поступают стоимость отобранных для расчёта солнечных панелей, ветрогенераторов и аккумуляторов, целевая функция согласно методике предварительной параметрической оптимизации АГЭС и ограничения по пространству поиска. Далее производится первичная инициализация алгоритма оптимизации, выделяется память, необходимая для выполнения расчётов, подготавливаются абстрактные «пчёлы», участвующие в расчётах.

Во время проведения практических тестов по определению оптимальных параметров было обнаружено, что приемлемыми по времени выполнения расчёта и точности итоговых значений являются следующие параметры для инициализации алгоритма оптимизации:

- первичный запуск 100 «пчёл-разведчиков»;

- выделение 50 лучших решений среди всех найденных;
- выделение 25 случайных решений среди оставшихся;
- отправка по 100 «пчёл» в область поиска для каждого из набора лучших решений;
- отправка по 50 пчёл в область поиска для каждого из набора случайных решений;
- выполнение 250 итераций расчёта;
- сужение области поиска с каждой итерацией на 1 % от предыдущего размера области.

После инициализации производится первичный запуск 100 «пчёл» в случайные точки пространства поиска. В данных позициях производится проверка на выполнение заданных ограничений, и выполняется расчёт стоимости системы по заданным параметрам.

Среди найденных решений выполняется ранжировка по критерию минимума стоимости системы по выбранным параметрам (координатам «пчёл»). Лучшее локальное решение сохраняется как глобальное лучшее, 50 лучших решений запоминаются в наборе «лучшие решения», 25 решений среди оставшихся запоминаются в наборе «другие решения».

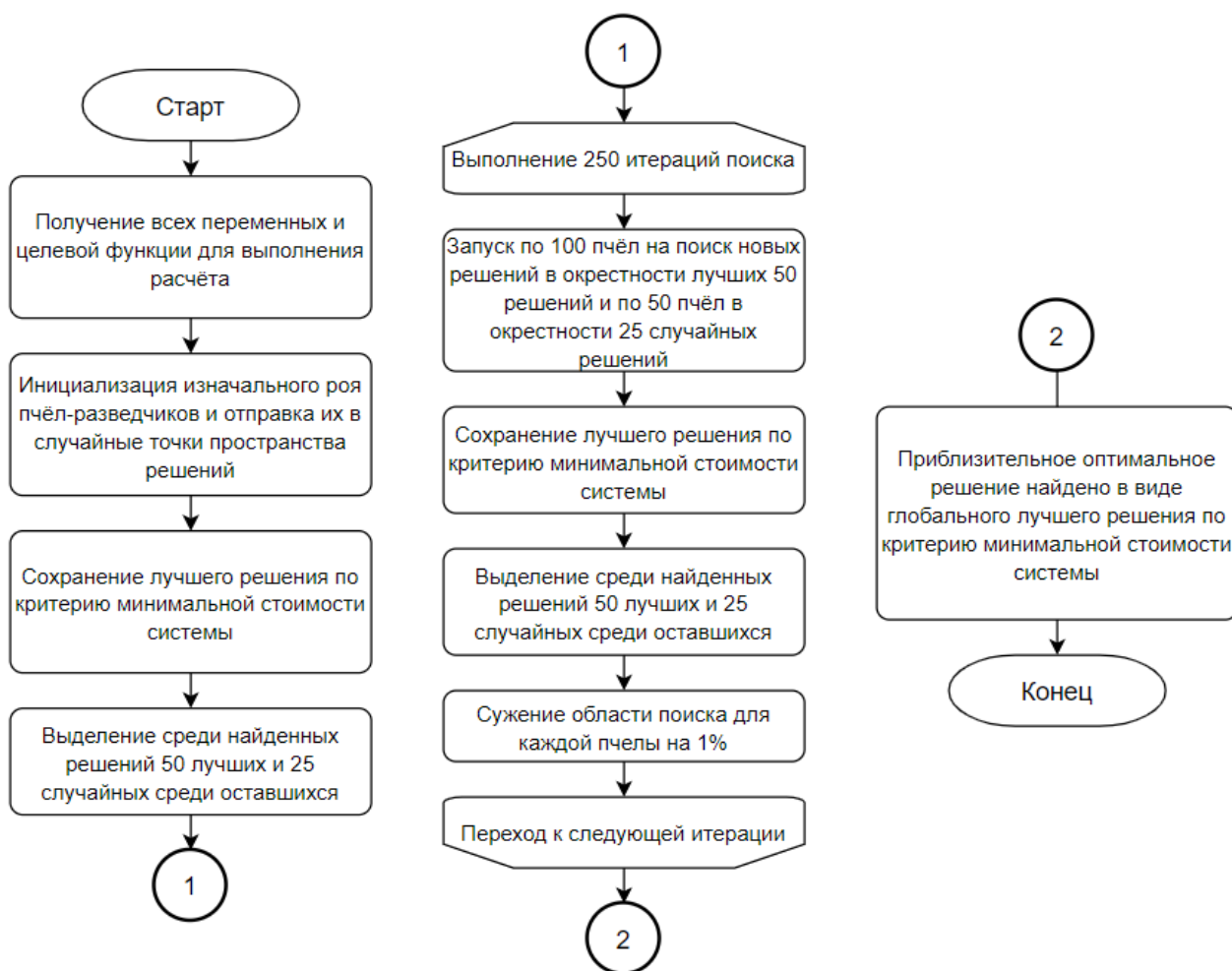


Рис. 3. Высокоуровневая блок-схема алгоритма оптимизации целевой функции

Далее выполняются 250 итераций попыток улучшения найденного глобального оптимума. В каждой итерации производится запуск по 100 пчёл в окрестности каждой точки пространства из набора «лучшие решения» и по 50 пчёл в окрестности каждой точки пространства поиска из набора «другие решения». В общей сложности на каждой итерации цикла по заданным первоначальным параметрам алгоритма оптимизации выполняется  $100 \cdot 50 + 50 \cdot 25 = 6250$  проверок точек на соответствие критерию минимума стоимости конфигурации оборудования. Далее снова выполня-





ется сохранение нового глобального оптимума, при его наличии, выделяются новые наборы «лучшие решения» и «другие решения», размеры окрестностей поиска пчёл сужаются на 1 % от предыдущих значений.

После выполнения всех итераций поиска в результате на выходе имеется глобальное оптимальное решение алгоритма «рой пчёл», которое является приблизительным и приемлемым оптимальным решением задачи оптимизации параметров автономных гибридных энергетических систем. Для демонстрации результатов расчёта алгоритма использовалась информация по посёлку Савинское Ульчского района Хабаровского края (см. табл. 1).

Таблица 1

Параметры и стоимость оборудования АГЭС при разных итерациях

Номер итерации	Количество солнечных панелей	Количество ветрогенераторов	Количество аккумуляторов	Общая стоимость конфигурации (тыс. р.)
1	10 951	0	1026	207 889,70
2	9803	0	978	187 808,70
3	8846	0	987	172 462,20
4	7895	0	985	156 899,00
5	6985	0	995	142 347,40
10	3439	12	1143	96 742,70
25	1224	0	762	87 591,60
50	1538	47	1065	86 791,09
150	1769	44	936	84 873,15
250	1771	43	946	84 526,76

По результатам расчёта было выявлено, что оптимальным будет включение в конфигурацию АГЭС в посёлке Савинское 1771 солнечной панели, 43 ветрогенераторов и 946 аккумуляторов. Общая стоимость оборудования без учёта установки и настройки составит 84 526,76 тыс. р. по состоянию на октябрь 2020 года.

#### Хранилище данных

В качестве хранилища информации для Energy Device Calculator была выбрана реляционная база данных MSSQL Server 2017 Express. Данное решение выбрано из-за характера хранимых данных. Схема базы данных, используемая в программном обеспечении на октябрь 2020 года, представлена на рис. 4.

Таблицы базы данных были сгенерированы автоматически адаптером для Entity Framework Core 3.1.4 Microsoft.EntityFrameworkCore.SqlServer 3.1.4. Такое решение было выбрано для простоты поддержки соответствия схемы базы данных с внутренней математической моделью Energy Device Calculator.

#### Аутентификация и авторизация

В разработке модуля аутентификации и авторизации использовалась встроенная в ASP.NET Core система ASP.NET Core Identity, которая позволяет с минимальными усилиями и высокой надёжностью реализовать проверку личности пользователя. Доступ к веб-приложению предоставляется на основе сессионного механизма.

#### Результаты работы Energy Device Calculator

Рассмотрим результаты работы на примере посёлка Савинское Хабаровского края. Посёлок Савинское располагается на 52°09' с.ш., 140°22' в.д. Результаты расчётов годовых энергетических балансов представлены в табл. 2 и на рис. 5-7.

Расчёт на рис. 5 даёт очень грубые оценки количества необходимого оборудования и его стоимости, т. к. не позволяет провести оптимизацию с учётом требований к аккумуляторам.

Расчёт на рис. 6 позволяет провести параметрическую оптимизацию и снизить при этом стоимость оборудования в несколько раз.



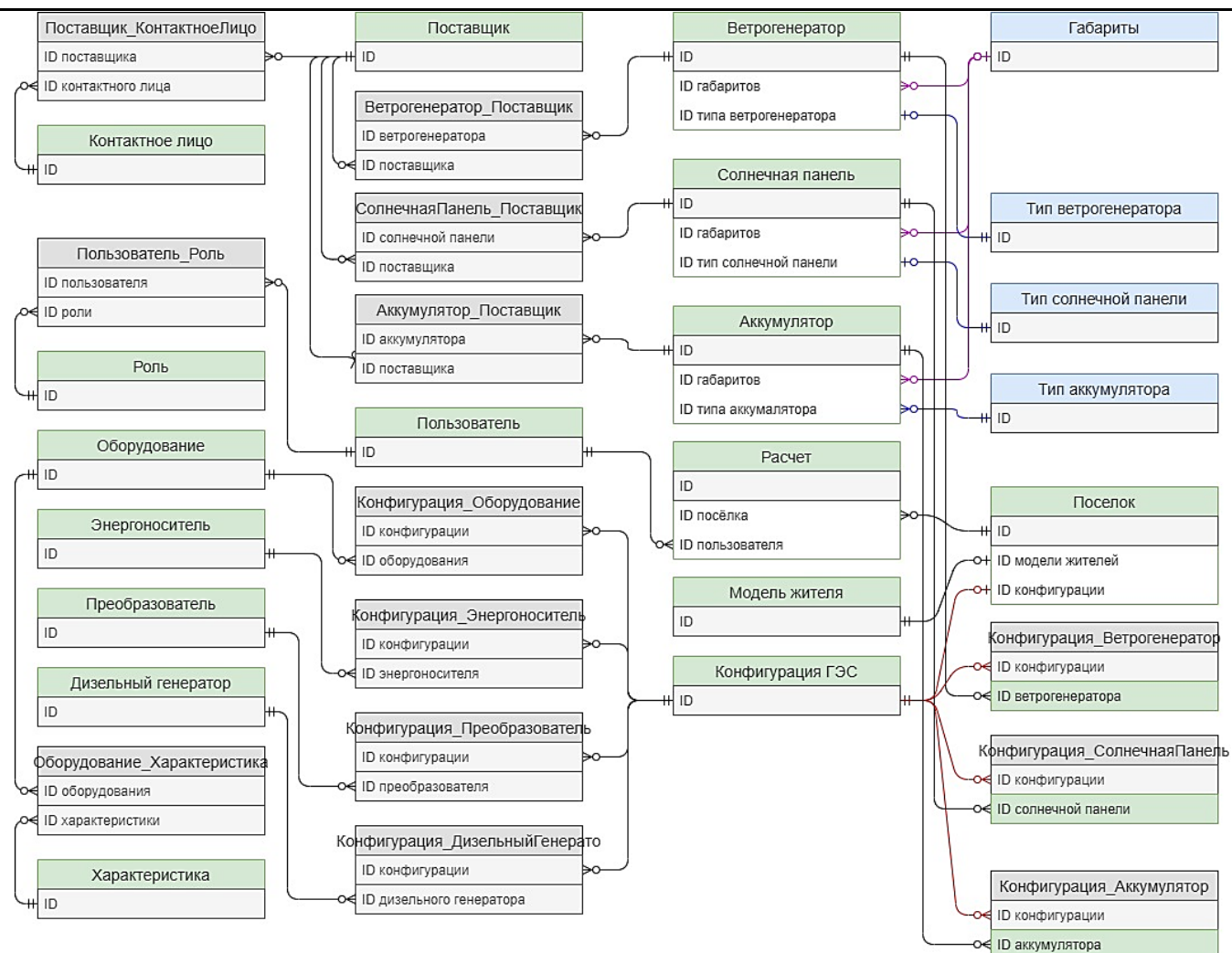


Рис. 4. Схема таблиц используемой базы данных

Таблица 2

Расчёты годовых энергетических балансов

Оборудование	Параметры	Погодовой баланс		Помесячный баланс	Подневной баланс	Почасовой баланс
Солнечные панели	Количество, шт.	1510	0	1 208	1771	1822
	Стоимость, тыс. р.	24 620	0	19 696	28 876	29 707
Ветрогенераторы	Количество, шт.	0	80	16	43	47
	Стоимость, тыс. р.	0	53 200	10 640	28 595	31 255
Аккумуляторы	Количество, шт.	-	-	77 000	946	1006
	Стоимость, тыс. р.	-	-	2 202 151	27 055	28 771
Общая стоимость	тыс. р.	24 620	53 200	2 232 487	84 526	89 733
Стоимость на одного жителя	тыс. р.			6 067	230	244
Обеспечение непрерывности подачи энергии		Нет	Нет	Да	Да	Да

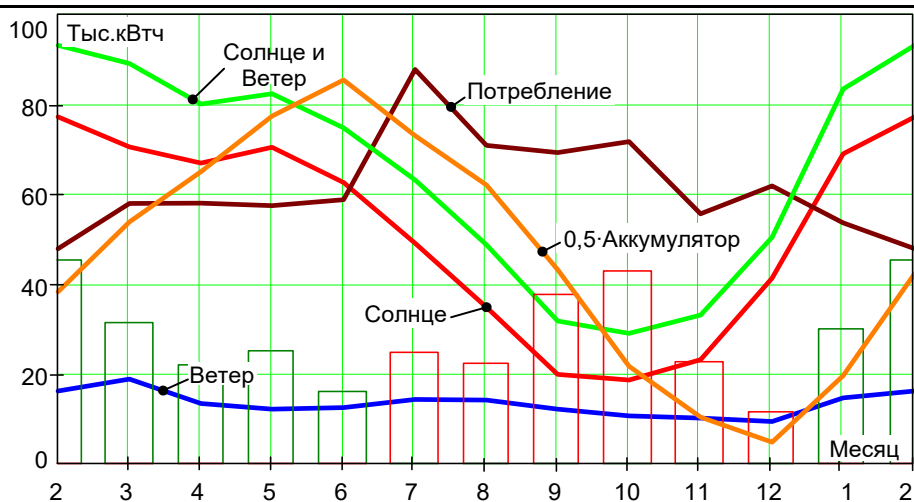


Рис. 5. Помесячный энергетический баланс

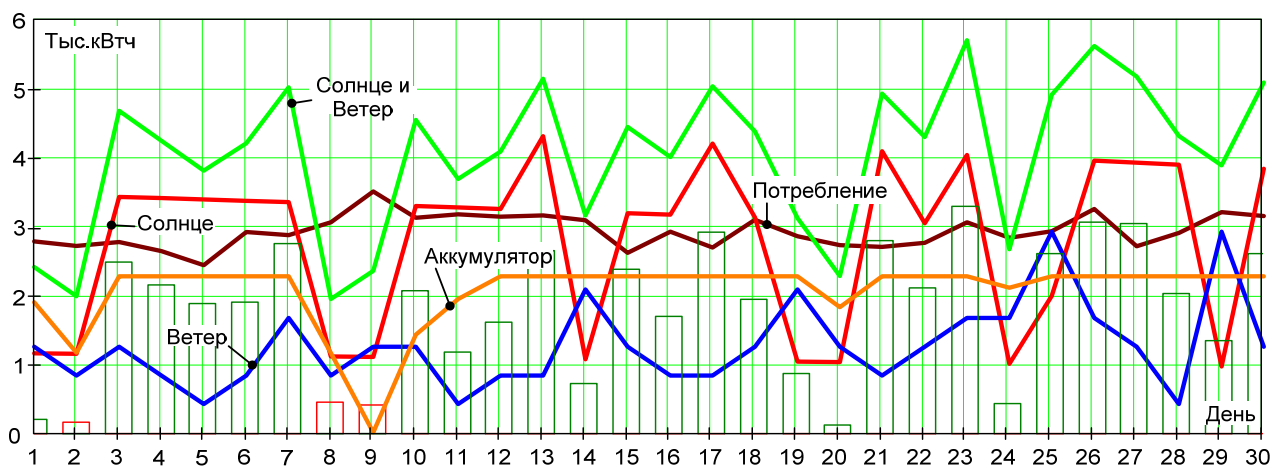


Рис. 6. Подневной энергетический баланс

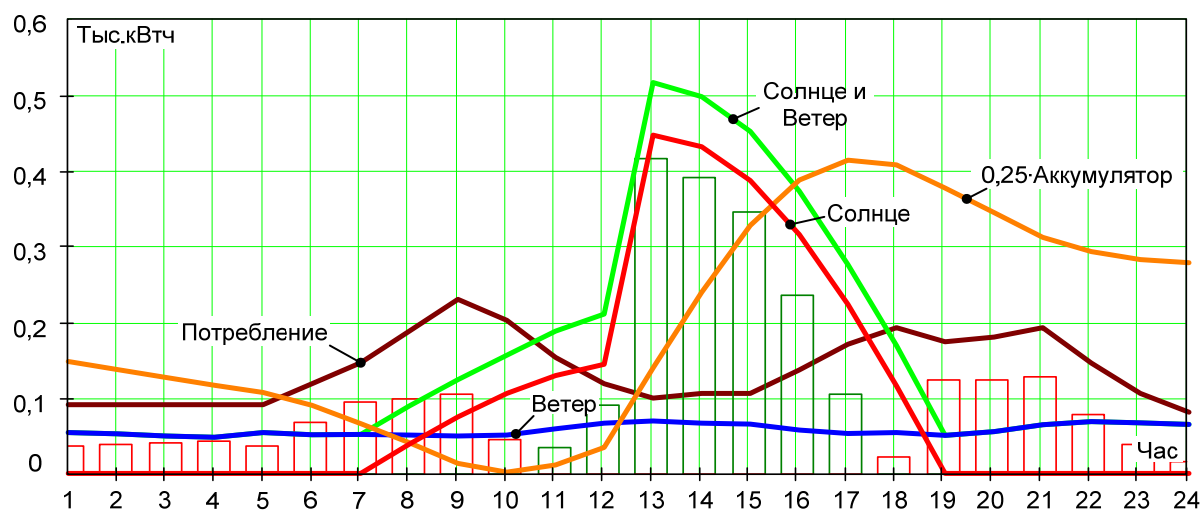


Рис. 7. Почасовой энергетический баланс

Расчёт на рис. 7, как и предыдущий, позволяет провести оптимизацию оборудования, повышенная дискретизация (почасовая) позволяет более точно учитывать необходимое количество аккумуляторов.

Представленные на рис. 8 результаты расчётов вкладов оборудования для энергетических балансов с разной дискретизацией показывают, что оптимизация, выравнивая вклады оборудования, существенно (более чем в 20 раз) уменьшает общую стоимость оборудования. Сравнение подневных и почасовых балансов показывает, что стоимость оборудования при почасовом балансе незначительно больше (немного больше 6 %). На основании этого можно сделать вывод, что достаточно производить расчёты по подневному балансу с девятипроцентным увеличением количества оборудования каждого типа.

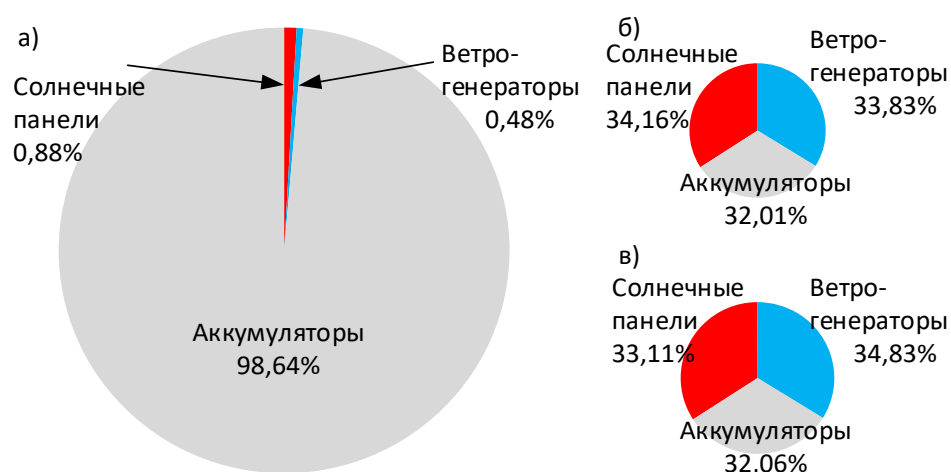


Рис. 8. Распределение вклада по стоимости оборудования АГЭС:

а – по месячному балансу (без оптимизации);

б – по подневному балансу (с оптимизацией); в – по почасовому балансу (с оптимизацией)

### Заключение

Разработан программный комплекс, позволяющий на основе энергетических балансов АГЭС провести оптимизацию количественного состава оборудования АГЭС. Оптимизация позволила получить значительный выигрыш в общей стоимости оборудования. Программный комплекс может использоваться для параметрической оптимизации АГЭС автономных посёлков Хабаровского края, не имеющих связи с централизованной энергетической системой. Широкие возможности по заданию степени дискретизации при расчётах от месячных до почасовых позволяют выработать рекомендации по использованию подневной дискретизации, позволяющей получить достоверные данные при приемлемых вычислительных затратах. Дальнейшее совершенствование методов оптимизации должно быть направлено на модернизацию моделей входных и выходных энергетических потоков.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Yu Fu, Jianhua Yang, and Tingting Zuo. Optimal Sizing Design for Hybrid Renewable Energy Systems in Rural Areas, in Book Computer and Computing Technologies in Agriculture, 4th IFIP TC 12 Conference, Nanchang, China, Part II, 2010. – P. 131-138.
2. Amina Gaabour, Abderrezak Metatla, Ridha Kelaiaia, Farid Bourennan, Adlen Kerboua. Recent Bibliography on the Optimization of Multi-source Energy Systems, in Book Archives of Computational Methods in Engineering, 2018. – P. 1-22.
3. Maurizio Faccio, Mauro Gamberi, Marco Bortolini, and Mojtaba Nedaei. State-of-art review of the optimization methods to design the configuration of hybrid renewable energy systems (HRESs), in Journal Frontiers in Energy, Vol. 12. – P. 1-32.



4. Binayak Bhandari, Kyung-Tae Lee, Gil-Yong Lee, Young-Man Cho, Sung-Hoon Ahn. Optimization of Hybrid Renewable Energy Power Systems: A Review, in International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2015, Vol. 2, No. 1. – P. 99-112.
5. Berdonosov V. D., Shamak V. A., Zhivotova A. A., Zheltov M. V. Hybrid Power Systems Optimization For Regions Of The Far North // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2019. 2019. P. 8934884. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934884.
6. Muthukumar R., Balamurugan P. A novel power optimized hybrid renewable energy system using neural computing and bee algorithm, in Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications, 2019, Vol. 60. – P. 332-339.
7. Matthew D. Stuber. A Differentiable Model for Optimizing Hybridization of Industrial Process Heat Systems with Concentrating Solar Thermal Power, in Journals, Processes, 2018, Vol. 6(7). – P. 1-25.
8. Iromi Ranaweera, Mohan Lal Kolhe, Bernard Gunawardana. Hybrid Energy System for Rural Electrification in Sri Lanka: Design Study, in Book Solar Photovoltaic System Applications, 2015. – P. 165-184.
9. Карты объектов возобновляемой энергетики на территории России [Электронный ресурс] / ГИС ВИА, 2021. – Режим доступа: <https://gisre.ru/maps> (дата обращения: 01.03.2021).
10. Дневник погоды в Комсомольске-на-Амуре [Электронный ресурс] / 1998 – 2021, Мэп Мэйкер. – Режим доступа: <https://www.gismeteo.ru/diary/4853/> (дата обращения: 01.03.2021).
11. Ranjay Singh, Ramesh C. Bansal, Arvind R. Singh, and Raj Naidoo. Multi-Objective Optimization of Hybrid Renewable Energy System Using Reformed Electric System Cascade Analysis for Islanding and Grid Connected Modes of Operation, in Journals & Magazines, IEEE Access, 2018, Vol. 6. – P. 47332-47354.
12. Debao Zhang, Junwei Liu, Shifei Jiao, Hao Tian, Chengzhi Lou, Zhihua Zhou, Ji Zhang, Chendong Wang, and Jian Zuo. Research on the configuration and operation effect of the hybrid solar-wind-battery power generation system based on NSGA-II, in Journal Energy, 2019, Vol. 189. – P. 116-121.
13. Victor D. Berdonosov, Sergey A. Gordin, Viktoria A. Shamak, Ilya O. Nedikov. Optimal Strategy of Storage Unit Selection for Stand-Alone Hybrid Power Systems. In Book Current Problems and Ways of Industry Development: Equipment and Technologies, 2020. – P. 735-743. DOI: doi.org/10.1007/978-3-030-69421-0\_79.
14. Бердоносков, В. Д. Методика расчёта для выполнения оптимизации необходимого количества аккумуляторов в автономной гибридной энергетической системе / В. Д. Бердоносков, В. А. Шамак, И. О. Недиков // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. – 2020. – № 3 (8). – С. 80-88.
15. Бердоносков, В. Д. Оптимизация гибридных энергетических систем для удалённых поселений на примере посёлка Чильба / В. Д. Бердоносков, В. А. Шамак // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 14 июня 2019 г. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2019. – С. 34-39.
16. Гордин, С. А. К вопросу повышения эффективности систем управления дутьём твёрдотопливных котлов / С. А. Гордин, И. В. Зайченко, М. С. Гринкруг // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № V-1 (45). – С. 25-30.

**Колесник М. Б., Просолович А. А.**  
**M. B. Kolesnik, A. A. Prosolovitch**

**АНАЛИЗ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО  
ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПРИ ОСЕВЫХ НАГРУЗКАХ**

**ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR  
WITH A SHORT-CIRCUITED ROTOR UNDER AXIAL LOADS**

**Колесник Максим Борисович** – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

**Maxim B. Kolesnik** – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kolmax2001@mail.ru.

**Просолович Алексей Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: alpr72@mail.ru.

**Aleksey A. Prosolovitch** – Associate Professor, Computer-aided Design System Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: alpr72@mail.ru.

**Аннотация.** Приведено сравнительное описание наиболее популярных и профессиональных пакетов по 3D-моделированию, использующих при решении задач метод конечных элементов. Обоснован выбор использования на данном этапе исследований пакета SolidWorks Simulation. Приведены его основные достоинства. Спроектирована 3D-модель реального функционирующего асинхронного двигателя и доработана для выполнения операций по линейному перемещению. Произведён статический анализ на прочность асинхронного двигателя с линейным перемещением исполнительного элемента с помощью подключаемого модуля SolidWorks Simulation. Проведён непосредственный анализ полученного результата напряжённно-деформированного состояния двигателя. Сделаны выводы о его пригодности к работе с осевыми нагрузками. Определены основные направления последующих исследований асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором при осевых нагрузках.

**Summary.** A comparative description of the most popular and professional 3D modeling packages using the finite element method in solving problems is given. The choice of using the SolidWorks Simulation package at this stage of research is justified. Its main advantages are given. A 3D model of a real functioning asynchronous motor has been designed and modified to perform linear displacement operations. A static analysis of the strength of an asynchronous motor with linear displacement of the actuator using the plug-in module SolidWorks Simulation was performed. A direct analysis of the obtained result of the stress-strain state of the engine is carried out. Conclusions are drawn about its suitability to work with axial loads. The main directions of subsequent research of asynchronous motors with a short-circuited rotor under axial loads are determined.

**Ключевые слова:** напряжённно-деформированное состояние, SolidWorks Simulation, статический анализ, напряжения.

**Key words:** stress-strain state, SolidWorks Simulation, static analysis, stresses.

УДК 621.31:621.25

**Введение.** Электрический привод (ЭП) играет большую роль в реализации задач повышения производительности труда в разных отраслях народного хозяйства, автоматизации и комплексной механизации производственных процессов. В статье рассматривается возможность при-



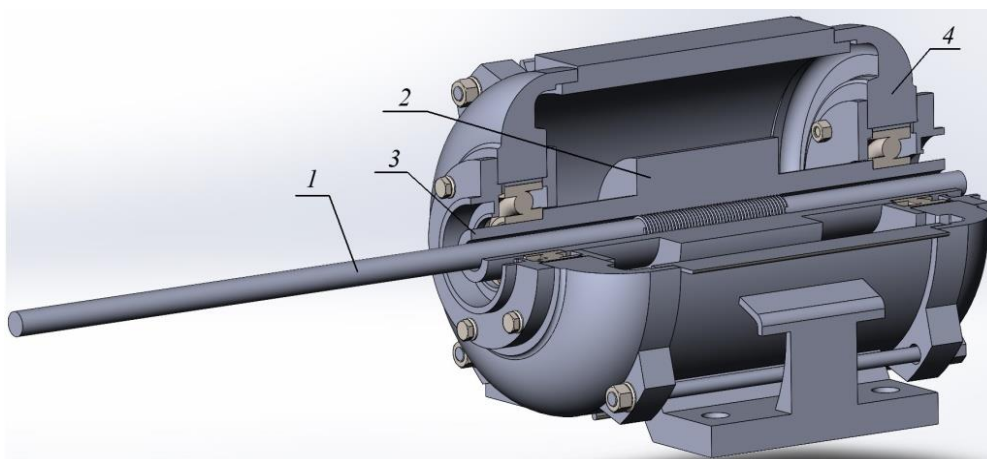
менения электропривода на основе асинхронного короткозамкнутого двигателя с линейным перемещением исполнительного элемента, конструктивное исполнение и принцип действия которого описаны в [1-2]. Применение такого типа ЭП может найти широкое применение на железной дороге, в авиастроении, строительстве, сельском хозяйстве и др.

Анализ конструкции электропривода на основе асинхронного двигателя с линейным перемещением исполнительного элемента показал, что используемое в нём сопряжение типа «винт-гайка» является наиболее слабым звеном привода, и для выбора размерных соотношений передаточных элементов была разработана методика, основу которой составили технические и эксплуатационные характеристики электромеханических преобразователей [3]. При этом определяющим критерием выбора размерных соотношений задаётся механическая устойчивость с учётом всех воздействующих усилий.

Основной задачей, решаемой в данной статье, являлось определение возможности использования асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при работе с осевыми нагрузками путём проведения анализа напряжённо-деформированного состояния конструкции методом конечных элементов в пакете SolidWorks Simulation.

**Обоснование выбора программы.** Среди существующих пакетов программ, позволяющих производить расчёты на прочность и тепловые расчёты, следует отметить программные пакеты MSC Nastran, Ansys и SolidWorks. После обзора данных программ был сделан выбор в пользу пакета SolidWorks Simulation. Основными достоинствами программы являются удобный интерфейс, позволяющий быстро её освоить, наличие русскоязычной версии, автоматическое и ручное создание конечного элемента сеток (трёх- и шестиузловые треугольники, четырёх- и десятиузловые тетраэдры), а её модели могут быть легко интегрированы в CAD/CAM/CAE-системы различных уровней [4].

**Объект исследования.** Для проведения исследования в программе SolidWorks была создана модель, соответствующая типовому асинхронному двигателю. Для осуществления операций по линейному перемещению модель была конструктивно модифицирована – в роторе предусмотрено технологическое отверстие, в котором нарезана трапецеидальная резьба для последующей установки исполнительного элемента (тяги). Конструктивное исполнение модифицированного двигателя представлено на рис. 1.



1 – исполнительный элемент (тяги); 2 – ротор; 3 – втулка ротора; 4 – корпус двигателя

Рис. 1. Конструкция двигателя с линейным перемещением исполнительного элемента

**Статический анализ.** Конструктивно двигатель представляет собой сложный механизм, и для того, чтобы оценить его способность выдерживать осевые нагрузки, необходимо учесть много внутренних и внешних факторов, поэтому для повышения эффективности получения результата задача была разделена на два этапа:

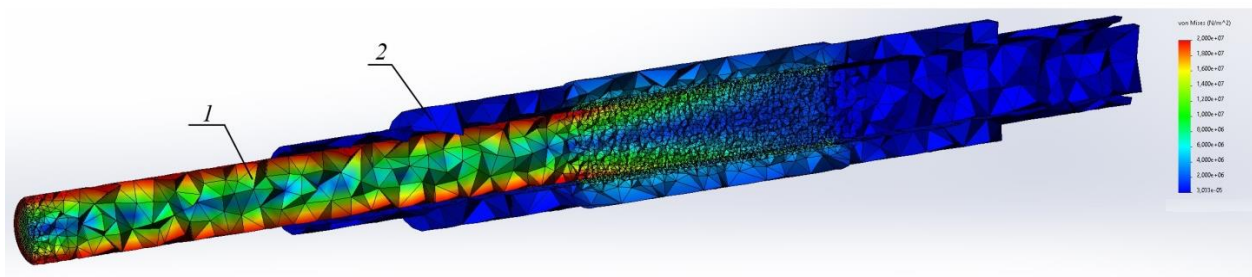


1. Анализ передаточного механизма, который конструктивно представляет собой втулку ротора и тягу с трапецеидальной резьбой, нарезанной на их внутренней и внешней стороне соответственно.

2. Статический анализ корпуса двигателя.

Для проведения статического анализа конструкциям на обоих этапах были заданы закрепления, определяющие их степени свободы, соответствующие данной задаче, и приложены внешние нагрузки в виде вращающего момента или силы.

Результат первого этапа исследования представлен на рис. 2. В данном случае вращающий момент приложен к втулке ротора и равномерно распределён по ней.



1 – исполнительный элемент (тяги); 2 – втулка ротора

Рис. 2. Статический анализ передаточного механизма типа «винт-гайка»

Анализ результатов показал, что наиболее нагруженной частью является исполнительный элемент. На рис. 3 видно, что нагрузка по виткам резьбы распределяется неравномерно и основная нагрузка приложена к первой половине витков, там же и возникают наибольшие напряжения во всей конструкции. На рис. 4 крупным планом показано распределение нагрузки на первых витках резьбового соединения [5].

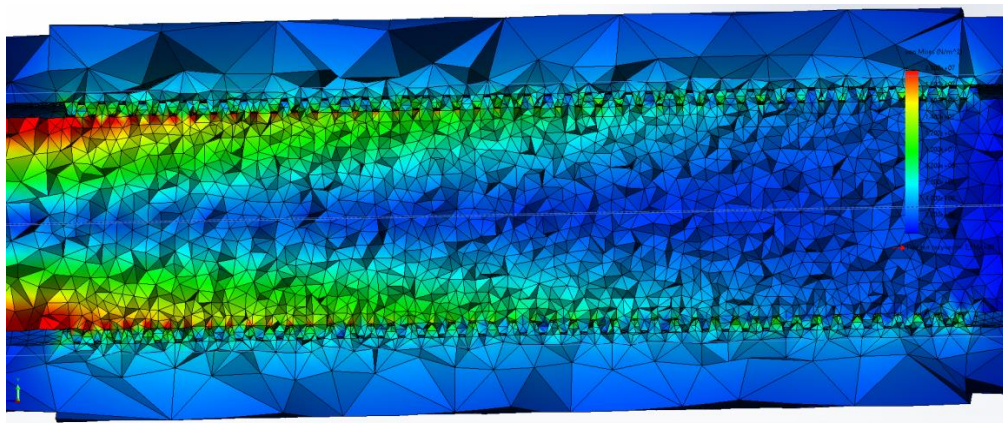


Рис. 3. Витковая область

Результаты второго этапа исследования представлены на рис. 5 и 6. В данном случае внешняя нагрузка приложена к правому (на рис. 5) подшипнику в виде равномерно распределённой силы. Её величина была определена из эпюры напряжений первого исследования. По рис. 5 и 6 следует отметить, что большие напряжения проявляются в местах затяжки болтовых соединений, а также на лапах, в местах крепления к корпусу двигателя (на рис. 5 – слева, на рис. 6 – справа), это связано с возникновением момента между областью крепления лап к корпусу и местом приложения силы [6].

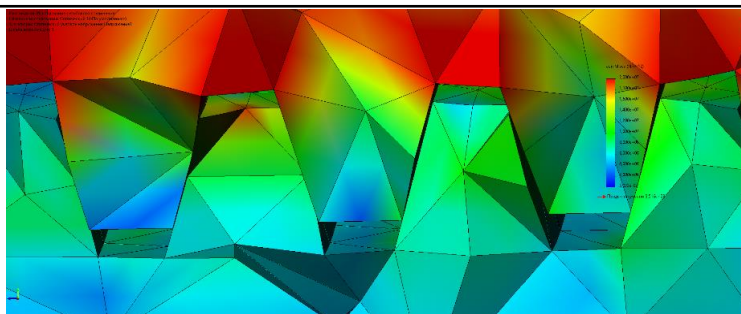


Рис. 4. Нагрузка в зубцах

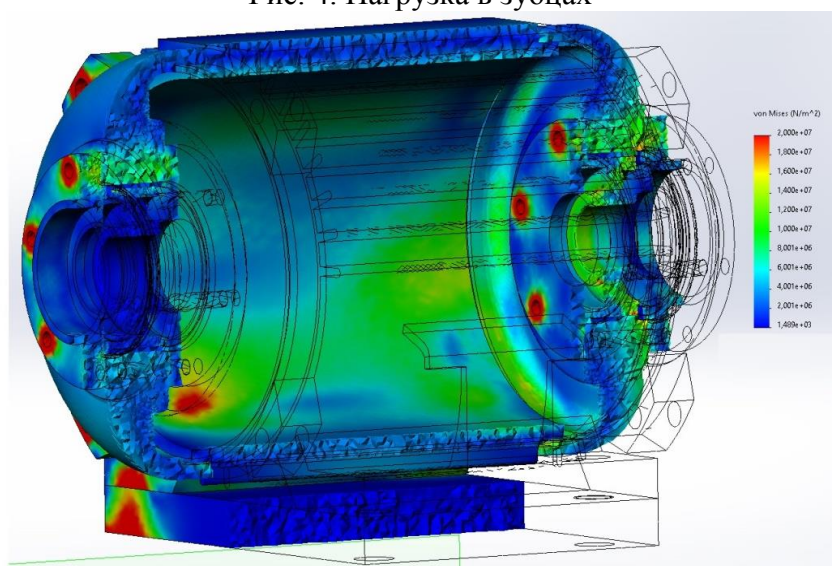


Рис. 5. Результаты статического анализа корпуса в разрезе

**Закключение.** Проведённые вычислительные эксперименты показали, что стандартный двигатель может выдерживать осевые нагрузки, но запас прочности по всей конструкции различный, в частности, максимальный запас прочности у корпуса двигателя, существенно меньший – у передаточного механизма.

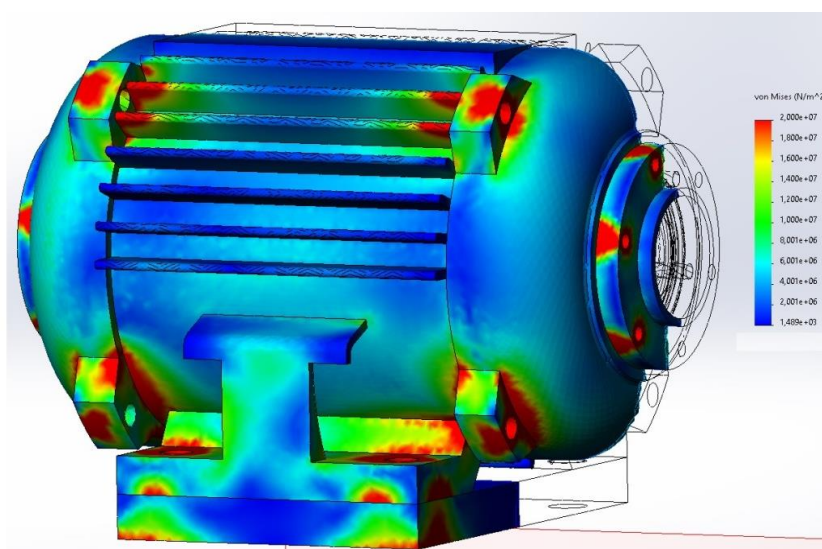


Рис. 6. Результаты статического анализа корпуса двигателя, вид снаружи

Для обеспечения принципа равнопрочности и повышения эффективности использования рассматриваемой конструкции электропривода необходимо, чтобы весь двигатель имел примерно одинаковый запас прочности, соответственно, его конструкция требует внесения изменений. Для этого необходимо проведение полного факторного эксперимента по определению возникающих напряжений в двигателе, по результатам которого можно установить определяющее и второстепенные проектные параметры [7].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Определение потерь в передаточных механизмах специальных электромеханических приводов / С. Н. Иванов, М. Б. Колесник, В. А. Макаренко, Т. К. Фискова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № V-1 (45). – С. 44-50.
2. Колесник, М. Б. Анализ совместимости в задаче управления безредукторным приводом стрелочного перевода / М. Б. Колесник, Ю. Б. Колошенко, А. А. Просолович // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № II-V-1 (47). – С. 14-19.
3. Ivanov, S. N. Synthesis Of The Control Device Of The Electromechanical Drive Of The Main Valve / S. N. Ivanov, K. K. Kim, A. V. Gorbunov // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 18-22 May. 2020, DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.911 2086.
4. Автоматизированный электромеханический привод вагонных дверей / К. К. Ким, С. Н. Иванов, А. В. Горбунов, Т. С. Титова, В. В. Никитин, И. Г. Киселев // Электротехника. – 2019. – № 10. – С. 11-16.
5. Постановка задачи выбора и алгоритм определения параметров передаточных элементов электромеханических преобразователей с учётом действующих напряжений / М. Б. Колесник, С. Н. Иванов, Ю. Б. Колошенко, А. А. Просолович, К. К. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № I-1 (49). – С. 29-36.
6. Биргер, И. А. Расчёт на прочность деталей машин: справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
7. Колесник, М. Б. Обеспечение эксплуатационной совместимости асинхронных двигателей с линейным перемещением исполнительного элемента / М. Б. Колесник, С. Н. Иванов, Ю. Б. Колошенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V-1 (53). – С. 24-29.





**Купова А. В., Соловьев В. А., Светлаков А. А., Челухин В. А.**  
**A. V. Kupova, V. A. Solovyev, A. A. Svetlakov, V. A. Chelukhin**

**СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СТАТИЧЕСКИМ ТИРИСТОРНЫМ  
КОМПЕНСАТОРОМ С НЕЧЁТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ В СИСТЕМЕ С ПЕРЕМЕННОЙ  
НАГРУЗКОЙ**

**VOLTAGE STABILIZATION BY A STATIC VAR COMPENSATOR WITH A FUZZY  
CONTROLLER IN A SYSTEM WITH A VARIABLE LOAD**

**Купова Анастасия Викторовна** – старший преподаватель кафедры «Теоретические основы электротехники» Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: avkupova@etu.ru.

**Anastasia V. Kupova** – Senior Lecturer, Theoretical Bases of Electrical Engineering Department, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI» (Russia, Saint Petersburg). E-mail: avkupova@etu.ru.

**Соловьев Вячеслав Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: epapu@knastu.ru.

**Vyacheslav A. Solovyev** – Doctor of Engineering, Professor, Electric Drive and Industrial Plant Automation Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: epapu@knastu.ru.

**Светлаков Анатолий Антонович** – доктор технических наук, профессор кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Россия, Томск). E-mail: office@kcup.tusur.ru.

**Anatolii A. Svetlakov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computer Systems in Control and Design, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Russia, Tomsk). E-mail: office@kcup.tusur.ru.

**Челухин Владимир Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры информационной безопасности Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольского-на-Амуре); тел. 8(909)898-02-31. E-mail: Cheluhin-va@mail.ru.

**Mr. Vladimir A. Chelukhin** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Information Security, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(909)898-02-31. E-mail: Cheluhin-va@mail.ru.

**Аннотация.** Электроприёмники, характеризующиеся как переменная нагрузка, оказывают негативное влияние на питающие сети. Изменения нагрузки вызывают значительные колебания напряжения, которые воздействуют на других потребителей электроэнергии. Для стабилизации напряжения в электрических сетях используют статические тиристорные компенсаторы. В статье приводятся результаты исследований режимов работы электроприёмников с переменной нагрузкой, к которым относятся дуговые сталеплавильные печи и прокатные станы. Рассматривается влияние режимов работы на алгоритмы нечёткого регулятора в системе управления статическим тиристорным компенсатором. Применение нечётких алгоритмов управления позволяет получить более высокие значения быстродействия и точности регулирования.

**Summary.** Electric receivers, characterized as a variable load, have a negative impact on the supply networks. Load changes cause significant voltage fluctuations that affect other electricity consumers. Static VAR compensators are used to stabilize the voltage in electrical grids. The article presents the results of studies of the operating modes of electric receivers with variable load, which include arc steel furnaces and rolling mills. The influence of operating modes on the algorithms of a fuzzy detector in the control system of a static thyristor compensator is considered. The use of fuzzy control algorithms allows us to obtain higher values of speed and accuracy of regulation.

**Ключевые слова:** статический тиристорный компенсатор, стабилизация напряжения, нечёткая логика.

**Key word:** static var compensator, voltage stabilization, fuzzy logic.

УДК 004.896

На качество электроэнергии в электрических сетях промышленных предприятий большое влияние оказывает характер нагрузки подсоединённых электроприёмников. Переменные и резко-переменные нагрузки приводят к отклонениям и колебаниям напряжения, несимметрии и несинусоидальности. В результате может наблюдаться увеличение потерь электроэнергии в сетях и электротехническом оборудовании, снижение срока службы и производительности оборудования. Наиболее сложные режимы энергопотребления наблюдаются у прокатных станов и дуговых сталеплавильных печей. Так как эти электроприёмники работают на больших мощностях, то проблема регулирования качества электроэнергии в точках их подключения является очень важной [1].

Для снижения негативного влияния на питающие сети искажающего электроприёмника зачастую используют статические тиристорные компенсаторы (СТК) [2; 3]. В целом наблюдается положительный опыт их применения в системах энергоснабжения промышленных предприятий, однако при помощи СТК не всегда удаётся достичь результатов, удовлетворяющих требованиям действующих стандартов. Так, например, на рис. 1 показаны характерные для металлургического завода графики отклонения напряжения  $\Delta U$  и дозы фликера  $Pst$  при работающей дуговой сталеплавильной печи. При этом для обоих показателей наблюдается превышение допустимых значений. В норме отклонение напряжения не должно превышать 10 %, доза фликера – 1,38 о.е.

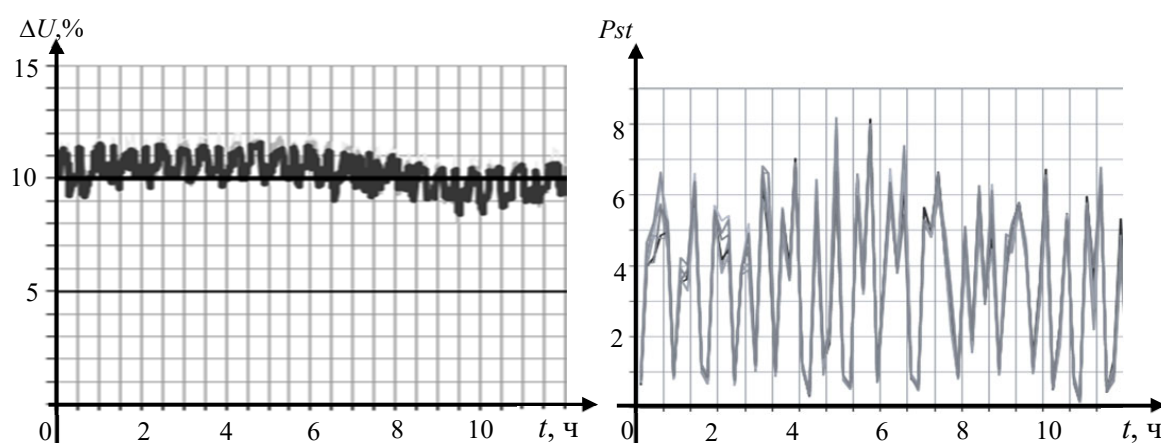


Рис. 1. Отклонение напряжения и доза фликера при работающей дуговой печи

Повышение эффективности работы СТК возможно за счёт применения более совершенных алгоритмов управления устройством. Формирование этих алгоритмов возможно только при детальном изучении процессов, протекающих в системе энергоснабжения, но такие исследования на реальном объекте приведут к существенным финансовым затратам. Поэтому в системе MatLab была разработана модель, показанная на рис. 2.

В качестве электроприёмника с переменной нагрузкой была выбрана дуговая сталеплавильная печь, т.к. в период расплава металла в ней наблюдаются наиболее сильные изменения в нагрузке, связанные с неустойчивым горением электрических дуг. Во время плавки в дуговой печи протекают различные физико-химические процессы, связанные с горением электрической дуги, химическими реакциями, распределением температур в ванне печи и т.п. Но так как все эти процессы являются взаимосвязанными, их влияние на питающие электрические сети может быть описано как изменение активной и реактивной мощностей. Поэтому в модели дуговая печь представлена как последовательное соединение переменных активно-индуктивных элементов [4]. Электро-снабжение печи осуществляется через печной трансформатор, вторичные обмотки которого переключаются для регулирования мощности, вводимой в печь. Устойчивое горение электрических

дуг возможно только при достаточно низком значении коэффициента мощности, поэтому в систему включён дополнительный реактор, который тоже имеет несколько ступеней переключения.

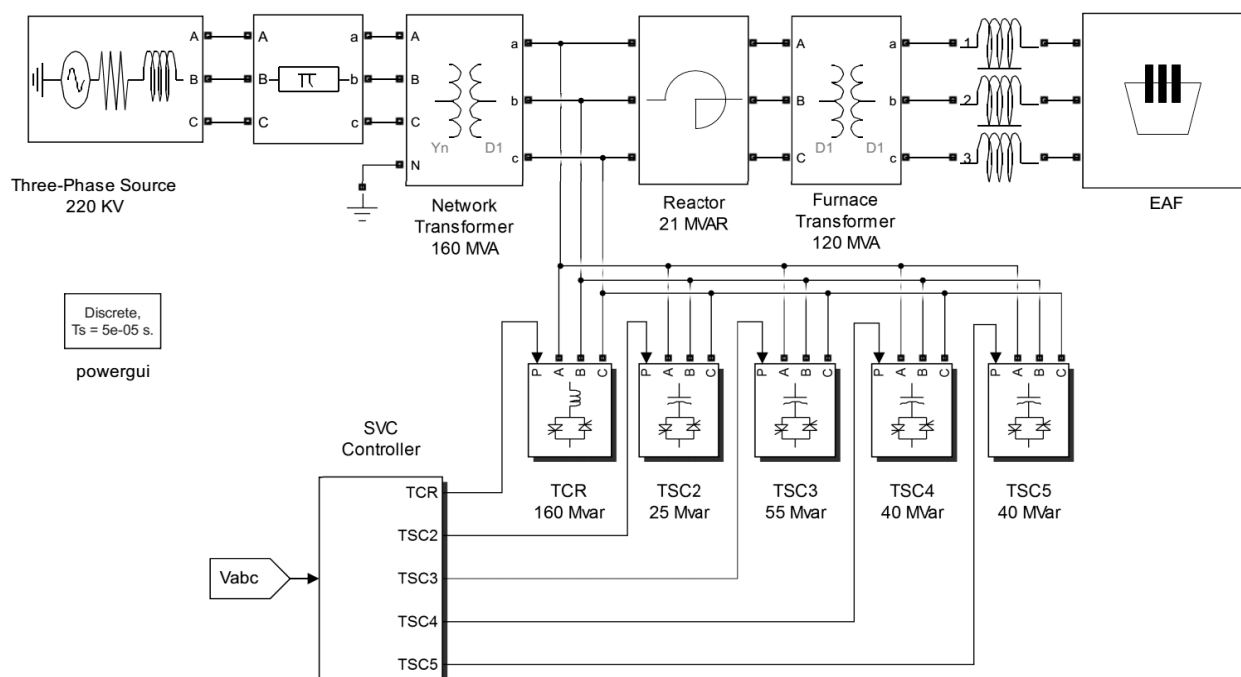


Рис. 2. Модель системы энергоснабжения с СТК в MatLab

СТК состоит из управляемого тиристорами реактора (TCR) и четырёх ступенчато коммутируемых ёмкостных фильтров (TSC). В рассматриваемой модели СТК построен на основе примера, приведённого в [5], при этом учитываются особенности исследуемой системы [6].

Как правило, для управления СТК используются регуляторы, реализующие ПИ-закон управления. В качестве сигнала управления СТК можно использовать уровень реактивной мощности или уровень напряжения. Кажется очевидным, что если в процессе работы дуговой печи наблюдаются значительные колебания реактивной мощности, зачастую превышающие колебания активной, то желательно осуществлять регулирование по её уровню. Однако в работах [7–9] показано, что в таком случае невозможно обеспечить необходимый уровень напряжения в точке подключения дуговой печи, а это влияет на её производительность и является нежелательным. Функциональная схема системы управления СТК по уровню напряжения показана на рис. 3.

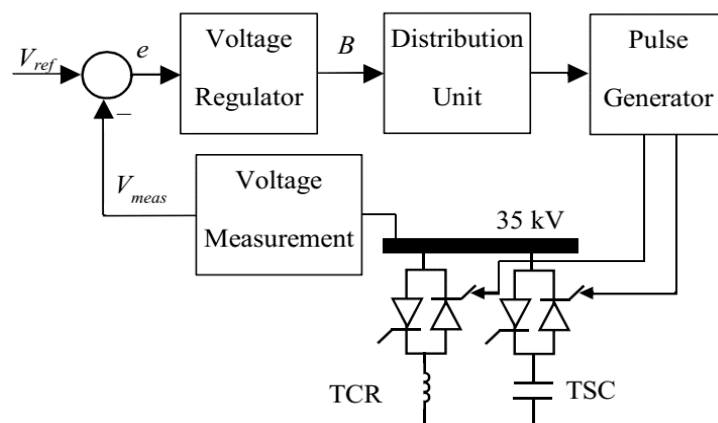


Рис. 3. Функциональная схема системы управления СТК



Входным сигналом регулятора является сигнал рассогласования  $e$  заданного  $V_{ref}$  и измеренного  $V_{meas}$  напряжений в точке подключения компенсатора. В процессе работы регулятора формируется сигнал проводимости  $B$ , на основании которого в блоке *Distribution Unit* происходит выбор группы элементов TSC и TCR, на которые будут подаваться управляющие импульсы для тиристорov. Затем эти импульсы вырабатываются в блоке *Pulse Generator*.

В рассматриваемой системе включено большое количество нелинейных элементов, что делает проблемным определение параметров регулятора аналитическими методами. Поэтому для получения значений пропорционального  $Kp$  и интегрального  $Ki$  коэффициентов был использован блок *Signal Constraint*, предназначенный для подбора оптимальных параметров регулятора численными методами [10].

На значения коэффициентов  $Kp$  и  $Ki$  оказывают сильное влияние режимы работы дуговой сталеплавильной печи. Эти режимы могут быть управляемыми, например при переключении обмоток печного трансформатора и реактора, и неуправляемыми из-за процессов внутри печи. В модели неуправляемые режимы имитируются при помощи изменения параметров  $R$  и  $X_L$ , которые характеризуют изменение потребляемых печью активной и реактивной мощностей. В качестве примера такого влияния в табл. 1 приводятся значения  $Kp$  и  $Ki$  для максимального по мощности режима печи, полученные при одинаковых начальных условиях и допустимом отклонении регулируемого сигнала не более 2 %. По приведённым результатам видно, что даже незначительное изменение нагрузки может привести к существенному изменению оптимальных параметров регулятора.

Таблица 1

Параметры ПИ-регулятора

$X_L = 5 \text{ мОм}$									
$R, \text{ мОм}$	0,1	1	2	3	4	5	6	7	8
$Kp$	14,85	26,34	1,00	22,04	14,91	17,32	14,42	4,00	4,00
$Ki$	14,75	7,83	232,30	21,76	2,98	3,21	1,51	1,00	1,41
$X_L = 9 \text{ мОм}$									
$R, \text{ мОм}$	0,1	1	2	3	4	5	6	7	8
$Kp$	15,73	15,10	14,30	15,98	16,88	13,71	5,30	4,00	4,00
$Ki$	1,72	39,29	8,40	4,63	1,67	2,16	1,01	0,99	3,46

Следует отметить, что выбор оптимальных параметров регулятора неоднозначен и зависит не только от выбора начальных условий, но и от допустимых отклонений регулируемого сигнала от заданного уровня. На рис. 4 приводится пример сравнения переходных процессов напряжения и коэффициента мощности в точке подключения СТК при выборе коэффициентов регулятора. Рассматривался один возможный режим работы печи, поэтому все параметры в системе были одинаковы, отличались лишь уровни допустимого отклонения напряжения. На рис. 4, *а* показаны переходные процессы с коэффициентами  $Kp = 11,64$  и  $Ki = 39,75$ , полученными при допустимом отклонении 1 %, на рис. 4, *б* – переходные процессы с коэффициентами  $Kp = 4$  и  $Ki = 1,91$ , полученными при допустимом отклонении 3 %.

В первом случае сигналы напряжения и коэффициента мощности достигают заданного значения с минимальным отклонением от заданного значения, однако наблюдается некоторая колебательность сигналов. С учётом того, что изменение параметров системы может происходить с частотой 1...12 Гц [1, 21], очевидно, что такие колебания значений не являются положительным признаком. Увеличение допустимых отклонений позволяет получить новые коэффициенты регулятора и добиться снижения колебательности сигнала напряжения, но при этом ухудшаются показатели коэффициента мощности.

Наиболее сложными при определении коэффициентов  $Kp$  и  $Ki$  являются режимы печи с максимальными значениями потребляемых мощностей. В некоторых случаях практически невозможно подобрать коэффициенты регулятора, которые позволили бы скомпенсировать реактивную

мощность в системе. Поэтому работу ПИ-регулятора в системе управления СТК для компенсации переменных нагрузок нельзя считать удовлетворительной. В качестве аналога можно рассмотреть работу системы управления на основе нечёткой логики. Применение нечётких регуляторов в системе управления СТК описано в работах [11–14]. Однако в этих работах рассмотрено применение СТК в системах передачи электроэнергии на дальние расстояния, соответственно, их функции отличаются от функций компенсатора в системе с переменной нагрузкой.

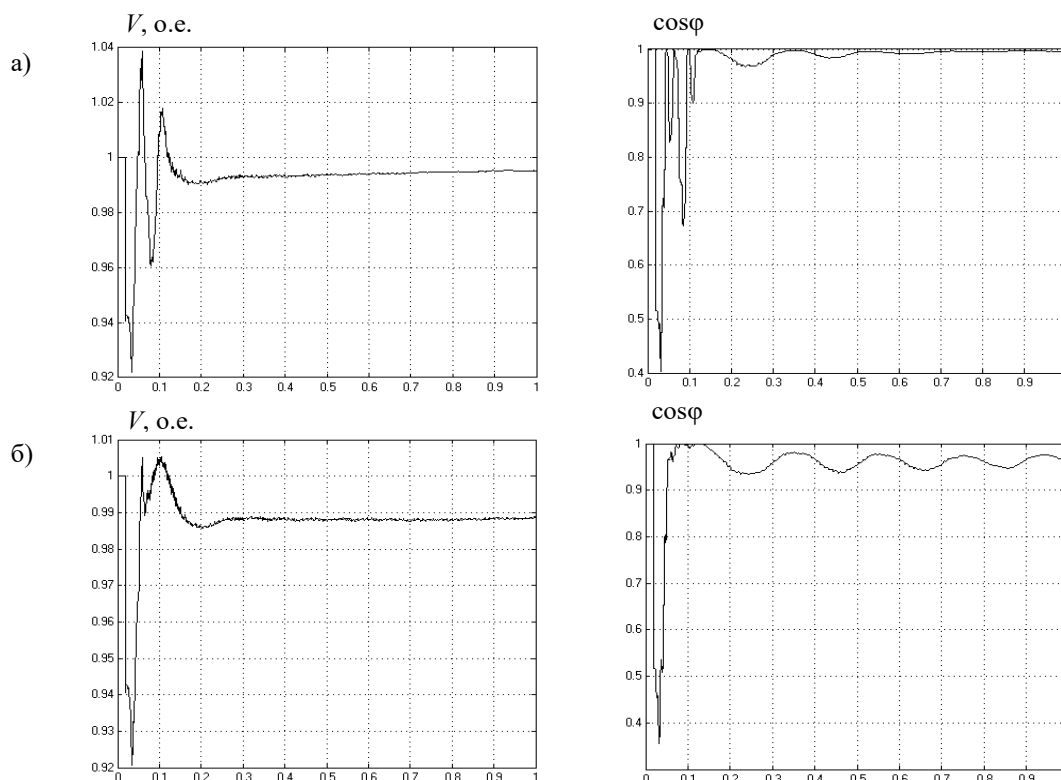


Рис. 4. Переходные процессы напряжения и коэффициента:  
а – 1 % отклонения, б – 3 % отклонения

Перед включением нечёткого регулятора в систему управления СТК следует определиться с входными и выходными лингвистическими переменными регулятора. Нечёткий регулятор позволяет использовать несколько входных (выходных) сигналов, но их количество не должно быть неоправданно большим, т.к. это увеличивает время отработки сигналов и, соответственно, снижает быстродействие регулятора. Для рассматриваемой системы важным является поддержание уровня напряжения в точке подключения, поэтому так же, как и для ПИ-регулятора, в качестве входного сигнала должен быть учтён сигнал рассогласования  $e$ . Использование производной  $de/dt$  позволит оценить скорость изменения напряжения и использовать это для определения выходной переменной  $B$ . Кроме того, следует учесть, что достижение заданного уровня напряжения осуществляется при включении определённых фильтров TSC, которые соответствуют значению  $B$  (см. рис. 3). Для того чтобы избежать бесконечного переключения фильтров в результате работы регулятора, он должен предусматривать, какой именно фильтр TSC включён в данный момент времени. Поэтому нечёткий регулятор дополняется входной переменной *Step TSC*. Схема включения нечёткого регулятора в систему управления СТК показана на рис. 5.

Области определения входных и выходной переменных были определены в результате проведения исследований на имитационной модели системы электроснабжения с переменной нагрузкой. По результатам настройки нечёткого регулятора были сформированы функции принадлежности этих переменных (см. рис. 6) и определены правила формирования выходной переменной (см. табл. 2).

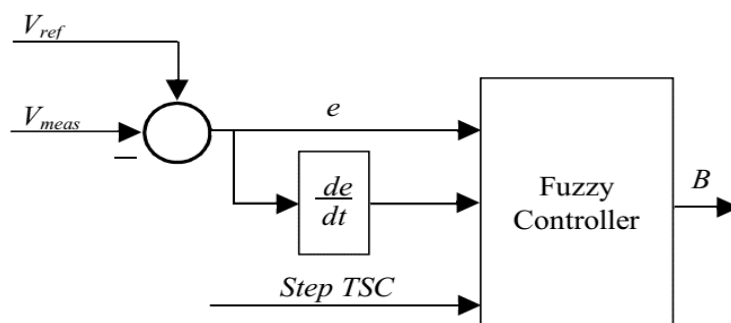


Рис. 5. Схема включения нечёткого регулятора

Переменная  $e$  имеет пять термов:  $N$  – перерегулирование;  $Z$  – положение около заданного значения;  $PS$  – малое отклонение от заданного значения;  $PM$  – среднее отклонение;  $PB$  – большое отклонение. Переменная  $de/dt$  содержит следующие термы:  $N$  – рассогласование быстро уменьшается;  $P$  – рассогласование быстро увеличивается;  $Z$  – рассогласование не изменяется или изменяется незначительно. Термы переменной  $Step\ TSC$  определяются количеством включённых фильтров:  $Step0$  – все TSC выключены;  $Step1$  – включён TSC2;  $Step2$  – включены TSC2 и TSC3;  $Step3$  – включены TSC2, TSC3 и TSC4;  $Step4$  – включены все TSC.

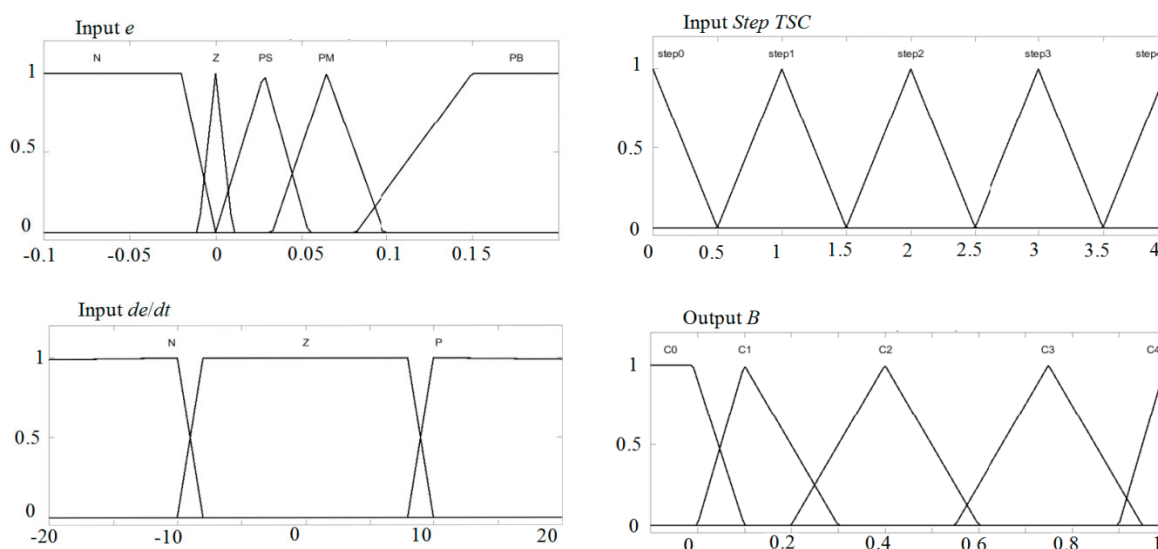


Рис. 6. Функции принадлежности входных и выходной переменных

Выходная лингвистическая переменная  $B$  изменяется в относительных единицах от 0 до 1. Значение «0» соответствует отключённому СТК, «1» – работающему на максимальной мощности. Функции принадлежности соответствуют значениям ёмкостной проводимости, которую вносят соответствующие элементы TSC.

Результаты работы нечёткого регулятора по стабилизации напряжения можно увидеть на рис. 7. Включение нагрузки приводит к понижению уровня напряжения до значения 0,885 о.е. При помощи нечёткого регулятора можно получить напряжение близкое по значению к заданному (перерегулирования менее 0,5 %), тогда как в системе с ПИ-регулятором только около 0,97 о.е. Также при помощи нечёткого регулятора хорошо компенсируется реактивная мощность. Выбранная нагрузка в точке подключения СТК снижает  $\cos\phi$  до значения 0,4. СТК с ПИ-регулятором в системе управления позволяет поднять коэффициент мощности до 0,9, с нечётким регулятором – до 1.

База правил нечёткого регулятора

$de/dt$	$e$	TSC				
		Step0	Step1	Step2	Step3	Step4
$Z$	$N$	C0	C0	C1	C2	C3
	$Z$	C0	C1	C2	C3	C4
	$PS$	C1	C2	C2	C3	C4
	$PM$	C1	C2	C3	C4	C4
	$PB$	C4	C4	C4	C4	C4
$P$	$N$	C0	C1	C2	C3	C4
	$Z$	C0	C1	C2	C3	C4
	$PS$	C1	C1	C2	C3	C4
	$PM$	C1	C2	C3	C4	C4
	$PB$	C2	C3	C4	C4	C4
$N$	$N$	C0	C0	C0	C1	C2
	$Z$	C0	C0	C1	C2	C3
	$PS$	C0	C0	C1	C2	C3
	$PM$	C0	C1	C2	C3	C4
	$PB$	C0	C1	C2	C3	C4

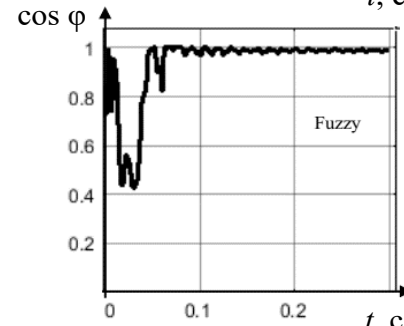
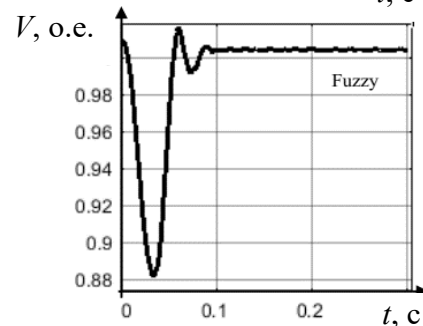
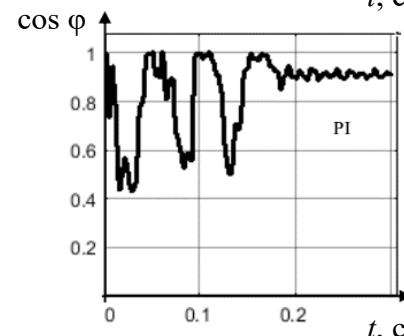
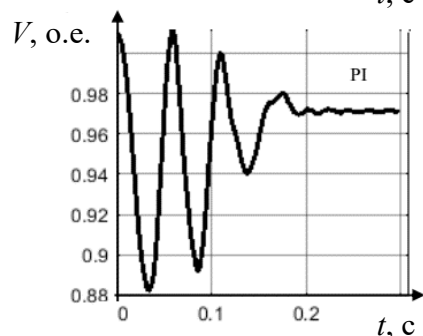
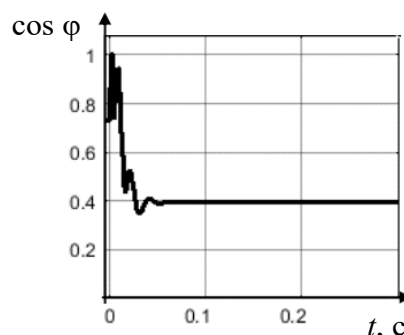
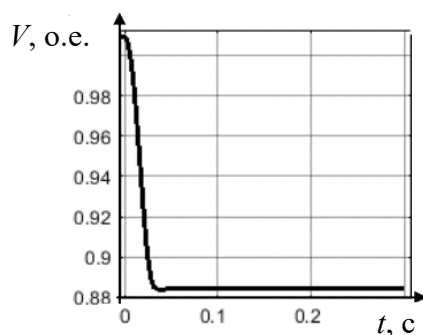


Рис. 7. Регулирование напряжения и коэффициента мощности

Для систем с переменной и резкопеременной нагрузкой особое значение имеет время переходного процесса. Нечёткий регулятор в системе управления СТК позволяет повысить её быстродействие почти в 2 раза по сравнению с ПИ-регулятором. На рис. 8 показаны результаты работы обоих регуляторов в системе с переменной нагрузкой. Так как изменение нагрузки происходит достаточно быстро, ПИ-регулятор не успевает выйти на установившиеся значения напряжения и коэффициента мощности. В сравнении с ним нечёткий регулятор позволяет получить лучшие результаты по стабилизации напряжения.

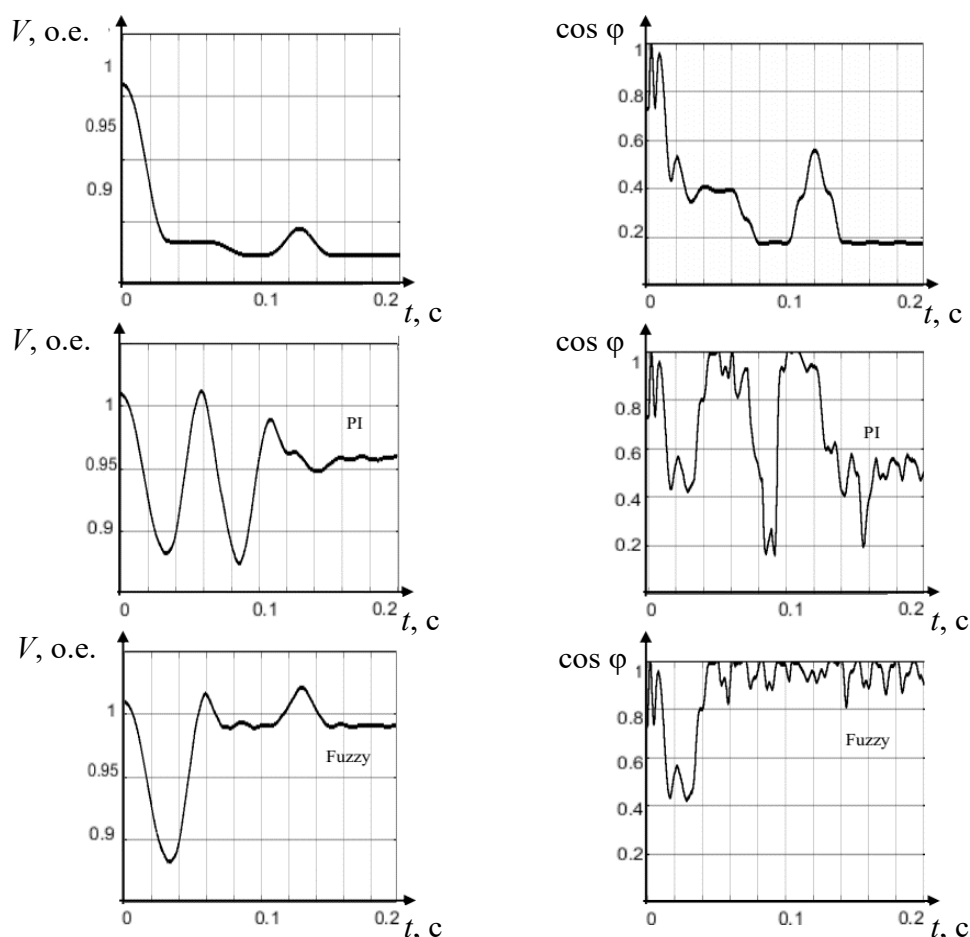


Рис. 8. Регулирование напряжения и коэффициента мощности в системе с резкопеременной нагрузкой

Несмотря на то что изменения нагрузки, соответствующие процессам внутри печи, носят случайный характер, эти изменения происходят в некоторых диапазонах, которые определяются режимами печи при переключении обмоток печного трансформатора и реактора. На рис. 9 показан приближённый график изменений вводимой в печь мощности при таких переключениях для соблюдения программы плавки металла. Такие изменения осуществляются в определённые моменты времени, а значит, их можно учесть в процессе работы нечёткого регулятора при помощи упреждающего сигнала.

Как упоминалось выше, увеличение количества входных переменных регулятора нежелательно, поэтому лучше скорректировать одну из уже имеющихся переменных. Переключение режимов печи приводит к быстрому изменению мощности, а значит, и быстрому изменению уровня напряжения. Такие изменения в системе характеризуются переменной  $de/dt$ . Если вывести эту пе-

ременную в область быстрых изменений (см. рис. 10) до наступления самих изменений, это позволит осуществлять компенсацию одновременно с изменением уровня напряжения.

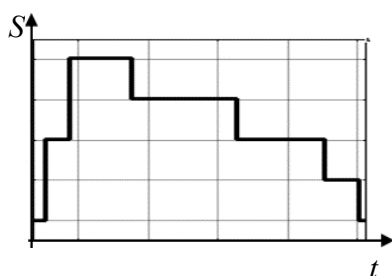


Рис. 9. График нагрузки дуговой сталеплавильной печи

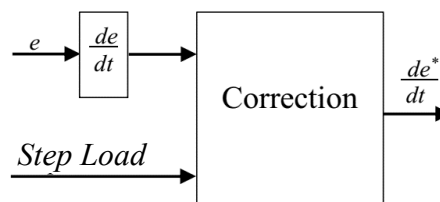


Рис. 10. Коррекция сигнала производной отклонения, учитывающая изменение режима нагрузки

На рис. 11 показаны графики изменения уровня напряжения в момент переключения мощности. Оба сигнала наблюдаются в системах управления с нечётким регулятором. Но в системе, учитывающей упреждающий сигнал переключения режима, наблюдается меньшее отклонение от заданного значения.

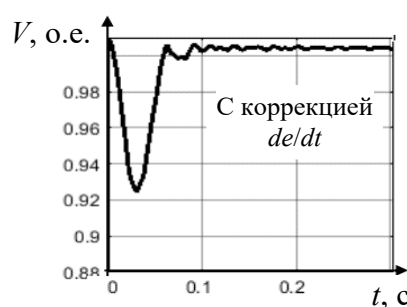
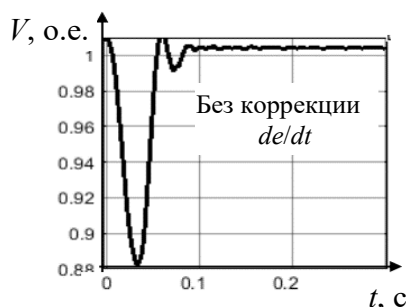


Рис. 11. Влияние упреждающего сигнала на работу нечёткого регулятора

Исследования, проведённые на имитационной модели системы энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи, говорят о важности выбора принципов функционирования системы управления статическим тиристорным компенсатором. В системе с ПИ-регулятором напряжение  $V$ , прежде чем прийти в установившиеся значение, успевает совершить несколько колебаний с весомым отклонением от заданного значения. В ситуациях с резкопеременной нагрузкой это приводит к полной нестабильности напряжения и невозможности скомпенсировать реактивную составляющую мощности в течение наиболее сложных периодов плавки. Применение нечёткого регулятора позволяет добиться лучших результатов по стабилизации напряжения и компенсации реактивной мощности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов, В. С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В. С. Иванов, В. И. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.
2. Hingorani, Narain G. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems / Narain G. Hingorani, Laszlo Gyugyi. – New York: IEEE PRESS, WILEY INTERSCIENCE, 2000. – 428 p.
3. Juan Dixon, Luis Moran, Jose Rodrigues, Ricardo Domke, 2005 «Reactive Power Compensator Technologies: State-of-the-Art-Review», Proceeding of the IEEE, 93(12): p. 2144-2164.
4. Марков, Н. А. Электрические цепи и режимы дуговых электроустановок / Н. А. Марков. – М.: Энергия, 1975. – 20 с.



5. Pierre Giroux, Gibert Sybille. SVC (Detailed Model) [Электронный ресурс] / Mathworks USA, 1994-2017. URL: [http://www.mathworks.com/examples/simpower/mw/sps\\_product-power\\_svc\\_1tcr3tsc-svc-detailed-model](http://www.mathworks.com/examples/simpower/mw/sps_product-power_svc_1tcr3tsc-svc-detailed-model) (дата обращения: 18.08.2017).
6. Соловьев, В. А. Моделирование статического тиристорного компенсатора в системе энергоснабжения дуговой сталеплавильной печи / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, А. В. Купова // Вестник ЮУрГУ. Серия Энергетика. – 2014. – Т. 14. – № 2. – С. 23-28.
7. Николаев, А. А. Сравнительный анализ режимов регулирования статического тиристорного компенсатора в системе электроснабжения дуговой сталеплавильной печи высокой мощности / А. А. Николаев, Г. П. Корнилов, В. В. Анохин // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика. – 2016. – № 2. – С. 35-46.
8. Николаев, А. А. Система автоматического управления СТК с функцией контроля коэффициента реактивной мощности при стабилизации напряжения на шинах электросталеплавильного комплекса «ДСП-СТК» / А. А. Николаев, В. В. Анохин, Ф. Ф. Муталлапова // Инновации в науке. – 2016. – № 11 (60). – С. 150-162.
9. Особенности построения систем управления статического тиристорного компенсатора дуговой сталеплавильной печи / А. А. Николаев, В. Е. Котышев, В. В. Анохин, Ф. Ф. Урманова // Энергетические и электротехнические системы: международный сборник научных трудов / под ред. С. И. Лукьянова, Н. В. Швидченко. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2015. – С. 11-20.
10. Купова, А. В. Параметры регулятора при управлении статическим тиристорным компенсатором в системе энергоснабжения дуговой печи / А. В. Купова, А. В. Купов // Электротехнические комплексы и системы: материалы международной научно-практической конференции. В 2 т. Т. 2. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2017. – С. 20-24.
11. A. H. M. A. Rahim, H. M. Al-Maghraby, E. P. Nowicki, «Power system damping control through fuzzy static VAR compensator design including crisp optimum theory» Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, [s. l.], v. 11, n. 3/4, 2001, p. 185-194.
12. A. M. Abusorrah, «Optimal Power Flow Using Adaptive Fuzzy Logic Controllers», Mathematical Problems in Engineering [Электронный ресурс]. URL: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2013/975170/>.
13. S. P. Nangranya, A. R. Singha, A. Chandanb, «Chaos driven instability control using interval type-2 fuzzy logic controller for better performance», Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, [s. l.], v. 34, n. 3, p. 1491–1501, 2018.
14. N. Karpagam, D. Devaraj, P. Subbaraj, «Improved fuzzy logic controller for SVC in power system damping using global signals», Electrical Engineering, Vol. 91 Issue 7, March 2010. p. 395-404.
15. Ivanov, S. Synthesis Of The Control Device Of The Electromechanical Drive Of The Main Valve / S. N. Ivanov, K. K. Kim, A. V. Gorbunov // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 18-22 May. 2020, DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.911 2086.
16. Соловьев, В. А. Разработка математической модели процесса резания рубительной машины / В. А. Соловьев, А. И. Малукова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V-1 (53). – С. 47-51.



**Белокопытов А. Р., Гуляев А. В., Березнев А. М., Тен Е. Е., Фокин Д. С.**  
**A. R. Belokopytov, A. V. Gulyaev, P. S. Bereznev, A. M. Ten, D. S. Fokin**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ И ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИЯ ПОВЫШАЮЩЕЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЭКОСИСТЕМЫ INDUSTRIAL IOT**

**AUTOMATION AND DISPATCHING OF THE INCREASING PUMPING STATION USING  
DIGITAL TECHNOLOGIES OF THE INDUSTRIAL IOT ECOSYSTEM**

**Белокопытов Александр Русланович** – студент Электроэнергетического института Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); тел. 8(909)803-15-45. E-mail: belokopytov.a.r@yandex.ru.

**Alexander R. Belokopytov** – Student, Power Engineering Institute, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk); tel. 8(909)803-15-45. E-mail: belokopytov.a.r@yandex.ru.

**Гуляев Александр Викторович** – доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); тел. 8(914)312-79-84. E-mail: 89143127984@ya.ru.

**Alexander V. Gulyaev** – Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk); tel. 8(914)312-79-84. E-mail: 89143127984@ya.ru.

**Березнев Артём Максимович** – студент Электроэнергетического института Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); тел. 8(914)164-59-52. E-mail: artembereznev14@gmail.com.

**Artem M. Bereznev** – Student, Power Engineering Institute, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk); tel. 8(914)164-59-52. E-mail: artembereznev14@gmail.com.

**Тен Евгений Енгунович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); тел. 8(914)548-10-64. E-mail: ugene\_ten@mail.ru.

**Evgeniy E. Ten** – PhD in Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk); tel. 8(914)548-10-64. E-mail: ugene\_ten@mail.ru.

**Фокин Дмитрий Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика» Дальневосточного государственного университета путей сообщения (Россия, Хабаровск); тел. 8(962)501-23-28. E-mail: dimkof27@mail.ru.

**Dmitry S. Fokin** – PhD in Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Electronics and Electromechanics, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk); tel. 8(962)501-23-28. E-mail: dimkof27@mail.ru.

**Аннотация.** В данной статье рассматривается проект по разработке комплексной системы автоматизации насосной станции. В проекте представлен инновационный подход при проектировании систем диспетчеризации и технологий дистанционного доступа, которые ранее не использовались в автоматизированных системах управления промышленного уровня. В работе подробно описаны применяемые промышленные технологии. Проект стартовал в сентябре 2020 года, 1 декабря 2020 года насосная станция была запущена в эксплуатацию и функционирует в настоящее время. Работа имеет актуальное значение, так как содержит все компоненты современных автоматизированных систем, отвечающих требованиям цифровых технологий Индустрии 4.0. Центральной частью проекта является разработанная система взаимодействия отдельных приложений, позволяющая передавать информацию о станции различными способами. В данном проекте вводится новое понятие для автоматизированных систем управления технологическими процессами и промышленной автоматизации – специализированный промышленный бот. В автоматизированной системе управления предлагается использовать чат-бот Telegram для связи между оператором и системой диспетчерского контроля. При этом взаимодействие пользователя с чат-ботом выполняется с помощью набора команд или текстовых сообщений, которые обрабатываются на сервере Node-red.

**Summary.** This article discusses a project to develop an integrated automation system for a pumping station. The project presents an innovative approach to the design of dispatching systems and remote access technologies, which were not previously used in industrial-level automated control systems. The work describes in detail the applied industrial technologies. The project started in September 2020, on December 1, 2020, the pumping station was put into operation and is currently operating. The work is of current importance, as it contains all the components of modern automated systems that meet the requirements of digital technologies in Industry 4.0. The central part of the project is the developed system of interaction of individual applications, which allows transferring information about the station in various ways. This project introduces a new concept for automated control systems for technological processes and industrial automation – a specialized industrial bot. In the automated control system, it is proposed to use the Telegram chat bot for communication between the operator and the dispatch control system. In this case, the user's interaction with the chatbot is performed using a set of commands or text messages that are processed on the Node-red server.

**Ключевые слова:** автоматизация, Telegram, чат-бот, OPC-сервер, промышленный IoT, индустрия 4.0, АСУТП, насосная станция, сервер Node-RED, SCADA, промышленный бот, диалоговая платформа.

**Key words:** automation, Telegram, chat-bot, OPC server, industrial IoT, industry 4.0, process control system, pumping station, Node-RED server, SCADA, industrial bot, dialogue platform.

УДК 681.518;681.5.075

Электрические машины отличаются высокой эффективностью и большей экологичностью по сравнению с двигателями внутреннего сгорания. А вариативность исполнения открывает возможность точной модификации под каждую отдельную задачу. Также стоит отметить совместимость электрических машин с уже известными рабочими органами и появление новых, раскрывающих весь потенциал. Таким образом, возникло понятие – электропривод.

Электропривод занимает одно из важнейших мест в жизни современного человека, являясь основой мелких бытовых процессов и крупной промышленности. Всё это указывает на безграничную универсальность электрических машин, но в то же время каждая операция зачастую требует отдельного привода, а для чёткого исполнения технологического процесса необходим чуткий контроль за всей установкой, который одновременно должен быть максимально простым и понятным, если учесть, что физические законы устанавливают определённые рамки улучшения техники, в том числе и электрических машин. И в случае наличия максимально проработанной установки с сотнями приводов, которые достигли пика в своём конструкционном совершенствовании, возникают две проблемы:

1. Как повысить эффективность и так уже улучшенных машин?
2. Каким образом осуществить контроль такого количества устройств и датчиков?

Здесь выступает вперёд стремительно развивающаяся область индустрии – автоматизация и диспетчеризация технологических процессов. Используя достижения вычислительной техники, мы можем максимально эффективно, быстро и, самое главное, точно управлять и осуществлять наблюдение за огромным количеством процессов с минимальными человеческими трудозатратами. Иногда вмешательство человека в систему необходимо только в экстренных случаях, из этого можно сделать вывод, что автоматизация позволяет выполнять полностью автономные комплексы, что является огромным достоинством в мире, полном технологий и производства. Чем дальше заходит развитие человечества, тем сильнее возрастают потребности в ресурсах для обеспечения жизнедеятельности, в результате появляется необходимость модернизации объектов, в частности систем водоснабжения.

Современная плотная городская застройка создаёт дополнительную нагрузку на существующую инфраструктуру электрических сетей, магистрального водопровода и т.д. Поэтому ввод новых строительных объектов может приводить к снижению давления в системе водоснабжения. И если прочность трубопроводов рассчитывается на колоссальные длительные нагрузки, то проблема недостатка напора решается применением локальных источников дополнительного давления.



Один из вариантов исполнения таких установок является повышающая насосная станция (ПНС). Насосная станция – комплексная инженерная система для перекачки жидкостей из одного места в другое [1]. В проекте рассматривается район, в котором при проектировании системы водоснабжения была заложена ПНС, необходимая для ликвидации недостатка давления в питающей сети. На данный момент ПНС находится в ведении ТК «НК-Сити». Компания заключила договор на комплекс работ по монтажу дополнительного оборудования, автоматизации и диспетчеризации повышающей насосной станции для решения сложившейся проблемы. Исполнителями работ являются ГК «Интерфейс» и ООО «SmartEnergy», в рамках которых был реализован данный проект. Изначально ПНС была оборудована водопроводной системой, подключённой параллельно к магистральной сети, 4 насосными установками, выполненными на базе асинхронных двигателей 5A160M2УС и силовой контакторной цепи для ручного (управления) включения насосов в работу. Главным недостатком данной ПНС является её удалённость от главного диспетчерского пункта на расстояние 250 м, а также необходимость личного присутствия работника для включения и производства технологических операций.

К системе автоматизации и диспетчеризации технологического процесса были выдвинуты основные требования: простота работы технического персонала и экономичность построения системы. Совокупность этих требований обуславливает трудоёмкость общего решения, так как накладывает жёсткие ограничения как со стороны аппаратной части, так и со стороны программных средств. Одновременное исполнение обоих требований означает использование ограниченных по функционалу устройств и применение свободного (бесплатного) программного обеспечения. Возможное решение должно было обеспечить выполнение данных задач путём уменьшения количества сложного оборудования, а также максимальную визуализацию для простоты отслеживания и контроля технологического процесса.

С учётом наличия четырёх электродвигателей и необходимости плавного регулирования давления основой проекта стала схема каскадного подключения двигателей. Данный способ подключения реализуется связанной работой программируемого логического контроллера, общего частотного преобразователя и релейно-контактной схемы.

Программируемый логический контроллер (ПЛК) российского производства Segnetics SMH4 считывает данные с аналоговых датчиков температуры, давления и тока в подконтрольной системе. В случае понижения давления в сети водоснабжения ПЛК фиксирует отклонение измеряемой величины и подаёт управляющий сигнал на релейную группу, обеспечивая плавный запуск первого электродвигателя через частотный преобразователь Delta CP 2000. Скорость двигателя зависит от величины рассогласования регулируемого параметра (давление). Если давление, создаваемое первым насосом в номинальном режиме, не компенсирует падения сетевого давления в полной мере, то ПЛК выводит данный двигатель на питание от сети, а второй двигатель подключается к частотному преобразователю посредством релейно-контактной схемы для плавного запуска и создания дополнительного давления в системе. По аналогичному процессу подключаются последующие электродвигатели. Если величина рассогласования регулируемого параметра в пределах 5 %, то дополнительное давление снижается путём постепенного вывода насосов из работы частотным преобразователем. Обеспечение получения сигналов с дискретных датчиков реализуется за счёт двух расширительных модулей ПЛК MR-0800. Получение данных с аналоговых датчиков происходит через расширительный модуль FMR 1010.

В данном проекте задачами создания системы диспетчеризации являлись: отражение на мнемосхеме состояний насосов и шаровых кранов; вывод значений, получаемых с аналоговых датчиков (температура, давление, ток); создание системы оповещения об авариях посредством СМС-сообщений; создание системы архивации данных [9; 10] и составления отчётов. Дополнительными требованиями к разрабатываемой системе были простота её использования и кроссплатформенность.

Для того чтобы система диспетчеризации начала выводить контролируемые параметры на автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора, необходимо принять эти параметры от программируемого логического контроллера. Для этого ПЛК соединяется с мини-компьютером, уста-



новленным непосредственно на ПНС внутри шкафа управления, и посредством Ethernet образует с ним локальную сеть с соседствующими IP-адресами. К мини-компьютеру подключается GPRS-роутер с возможностью отправки СМС-сообщений, данный GPRS-роутер подключает мини-компьютер к глобальной сети Интернет. Для получения данных с ПЛК используется MasterOPC Universal Modbus Server компании ИнСАТ, настроенный на работу с ним посредством связи через протокол TCP/IP. В качестве программы [2] для осуществления диспетчеризации используется программный продукт компании ИнСАТ MasterSCADA третьей версии. MasterSCADA 3.x – это российская вертикально-интегрированная SCADA-система с многоуровневой клиент-серверной архитектурой [7]. Система универсальна и применяется для автоматизации и диспетчеризации объектов во всех отраслях промышленности [3]. С точки зрения цифровизации SCADA – это интеллектуальный двойник, искусственный интеллект, который позволяет нам реализовать основные принципы 4-й промышленной революции [11]. MasterSCADA 3.X RT32 является бесплатной версией локальной SCADA-системы, включает в себя интегрированную среду разработки, отладки и исполнения на 32 точки без ограничений по времени работы. Поскольку используемая версия продукта MasterSCADA является бесплатной, это накладывает некоторые ограничения на функционал работы. Данная версия программы ограничивается 32 значениями входных параметров, поэтому было принято решение шифровать информацию об авариях и о состояниях насосов и шаровых кранов, поступающую с ПЛК в 32-битный сигнал. Для расшифровки данного типа сигнала программой MasterSCADA предусмотрен функциональный блок «Распаковка аналогового 32-битного значения». Данный блок позволяет расшифровать приходящий с ПЛК аналоговый сигнал в двоичный код, соответствующий тому или иному состоянию насосов или кранов.

Также данная версия продукта MasterSCADA имеет ограничения на отправку СМС-сообщений, необходимых для информирования персонала об аварии. Используемый роутер IRZ RL01 имеет собственный веб-интерфейс, через который есть возможность в ручном режиме отправлять СМС-сообщения (одновременно только на один номер). Для автоматизации процесса было принято решение использовать web-api-роутер. Для отправки сообщения выполняется POST-запрос по протоколу HTTP на адрес роутера (URI/api/sendsms) через утилиту cURL. Для автоматического запуска команды в ОС Windows необходимо создать файл с расширением «.bat», который будет запускать данный процесс посредством командной строки ОС Windows, синтаксис команды имеет следующий вид:

```
cmd.exe /K curl -H "Content-Type: application/json" -X POST
http://root:root@192.168.1.10/api/sendsms -d "{\"recipient\": \"+79143127984\", \"message\": \"
Prevysheniye davleniya podachi \"}\".
```

Файл имеет определённую структуру и включает в себя следующие составляющие:

cmd.exe – запускает командную строку;

http://root:root@192.168.1.15 – обращение к адресу роутера;

/sendsms – команда на отправку сообщения;

\"recipient\": \"+7914312\*\*\*\*\" – мобильный номер получателя;

\"message\": \" Prevysheniye davleniya podachi \" – текст сообщения.

Для запуска файла формата «.bat» в программной среде MasterSCADA используется функциональный блок (ФБ) «Запуск процесса», который позволяет открыть тот или иной файл по указанному пути его расположения. При наступлении аварийного события ФБ «Событие» формирует команду, которая поступает на ФБ «Запуск процесса», который в свою очередь запускает файл формата «.bat» и отправляет СМС-сообщение об аварии посредством роутера.

В программе MasterSCADA была создана группа объектов, включающая в себя: распаковку сигнала об авариях; журнал об авариях, фиксирующий появление и снятие аварийной ситуации; сами аварии, вывод которых необходимо осуществлять. Для обслуживающего персонала ПНС требовалось определить следующие категории по авариям:

- авария насоса;
- авария датчика;

- превышение давления подачи;
- понижение давления подачи;
- превышение давления обратного потока;
- понижение давления обратного потока;
- вероятность порыва.

Также дополнительно требовалось создать систему оповещения об авариях для оператора, сюда вошли следующие аварии:

- отключение от сети;
- ошибка связи с контроллером;
- перегрев преобразователя частоты (ПЧ);
- ошибка сигнала от датчиков давления;
- низкий ток нагрузки ПЧ;
- обрыв входной фазы в ПЧ;
- обрыв выходной из ПЧ фазы;
- короткое замыкание выходной из ПЧ фазы;
- перегрузка по току ПЧ;
- ошибка связи с ПЧ.

Для каждого СМС-уведомления об аварии каждый отдельный номер телефона сотрудников был сформирован в индивидуальный файл о конкретной аварии и размещён в соответствующей папке. На данный момент к системе оповещения подключено: 4 номера слесарей, 2 номера инженеров, 1 резервный файл под номер телефона и 1 номер разработчика. Общее число составленных файлов СМС-сообщений составляет 56 штук.

После задания всех контролируемых параметров, объектов, системы аварии, создания системы журналов и отчётов была разработана мнемоническая схема контролируемого объекта. Конечная мнемосхема проекта имеет вид, представленный на рис. 1.

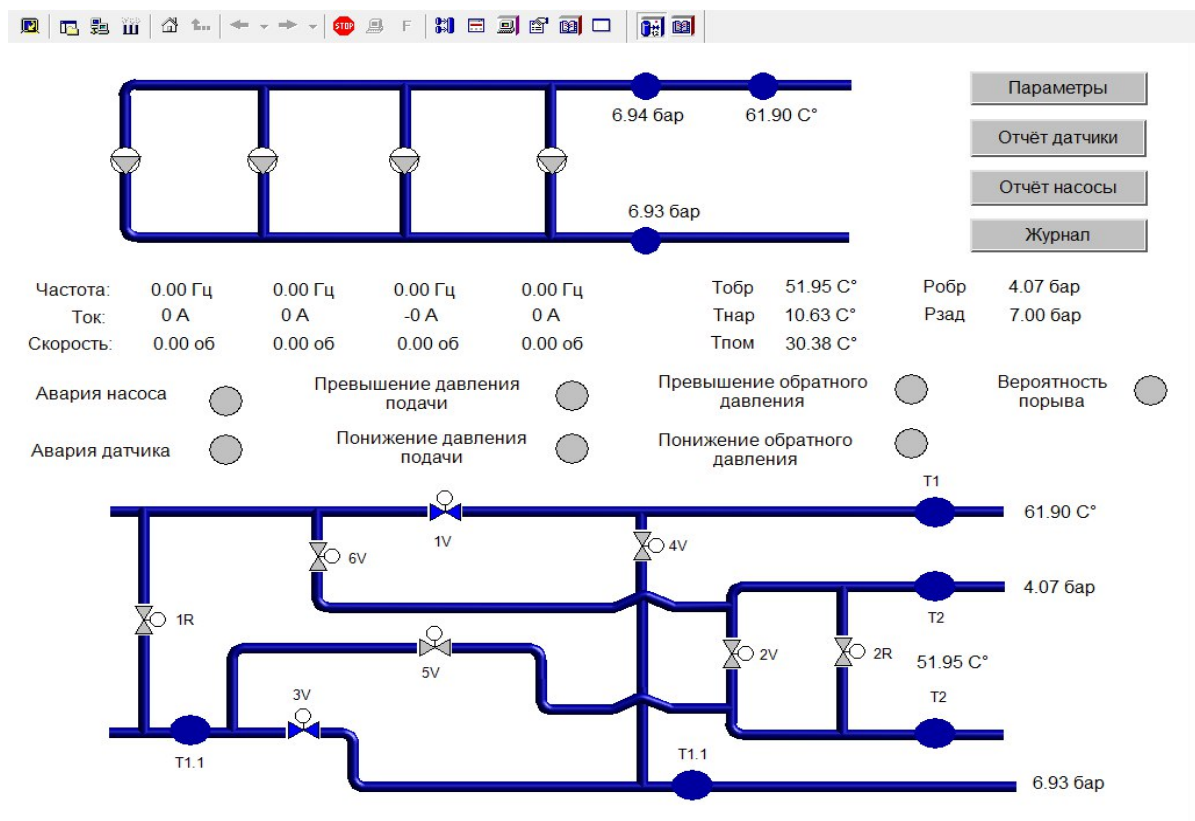


Рис.1. Мнемосхема проекта



В верхней части представлена схема расположения насосов, отражающая их состояние (включён, выключен, авария), также на схеме обозначены давление до и после насосной группы и температура воды на подаче. Ниже расположены параметры работы насосов: частота питающего напряжения, ток и скорость вращения. Правее находятся показания давления и температуры. В нижней части мнемосхемы располагается схема подключения вентилей, отражающая их состояние (открыт, закрыт). В средней части сосредоточены индикаторы по основным авариям. При возникновении аварийной ситуации они изменяют свой цвет на красный, запускается процесс отправки СМС-сообщений, также на мнемосхеме проекта открывается всплывающее окно, информирующее об аварии, типе аварии и времени её появления и окончания. В правой части мнемосхемы имеется 4 функциональные клавиши. Клавиша «Параметры» позволяет перейти к трендам и увидеть графики изменения параметров и значения параметров в определённый момент времени. Клавиша «Отчёт» позволяет просмотреть значения параметров в конкретный момент времени за предыдущие сутки, отчёты сохраняются ежедневно в отдельную папку в формате PDF. Клавиша «Журнал» отправляет к журналу об авариях, где можно просмотреть как активные аварии, так и аварии, которые закончили своё действие, т.е. снятые аварии, также можно увидеть время их возникновения и окончания. Все вышеперечисленные системы информирования можно сохранять в файл, делать снимок с экрана и отправлять на печать.

Подключение к компьютеру на ПНС осуществляется посредством облачного сервиса Open VPN Cloud (OpenVPN Cloud as-a-service), который образует локальный тоннель в интернете и позволяет использовать удалённый рабочий стол. Сложность в реализации дистанционного доступа обусловлена отсутствием возможности наладить VPN-тоннель или создать сервер данных, так как ни один из объектов, подключённых к сети Интернет, не имеет статического ip-адреса. В случае если организовать VPN-доступ невозможно или функции управления не требуются, можно использовать «тонкий» Интернет-клиент MasterSCADA [5].

Интернет-сервер MasterSCADA – это программа, позволяющая любому компьютеру в интернете обратиться к серверу по его ip-адресу и с помощью браузера получить доступ к просмотру документов SCADA-системы в статическом виде [5]. Интернет-клиент показывает документы в виде статического «снимка» мнемосхемы (в формате JPG) на момент получения запроса [5]. Так как между удалённым хозяйственным корпусом и пунктом диспетчера нет возможности организовать связь каким-либо способом кроме мобильной сети Интернет, то проблема подключения к системе управления из удалённых пунктов является сложной технической задачей. Разрешить проблему, связанную с контролем объекта в дистанционном режиме, возможно благодаря применению интернета вещей и облачных вычислений.

Для более удобного и быстрого просмотра системы диспетчеризации ПНС было разработано комплексное техническое решение, позволяющее связать оператора и систему автоматического управления посредством мессенджера Telegram. Такая система представляет собой особую конфигурацию аппаратно-программных средств, обеспечивающих передачу данных между разработанным специализированным промышленным чат-ботом и SCADA-системой. Программной основой их взаимодействия являются OPC-сервер и сервер Node-RED. В первую очередь необходимо в самом мессенджере создать чат-бот, присвоить ему имя, произвести соответствующие настройки и определить его токен (индивидуальный идентификатор бота). Связь всей системы автоматизации с чат-ботом осуществляется с помощью сервера Node-RED.

Telegram-боты – специальные учётные записи, которые служат интерфейсом для кода, исполняемого (в данном проекте) на сервере Node-RED. Через сервер Node-RED осуществляется обмен информацией между OPC-сервером и мессенджером по уникальным параметрам: bot token и chatID. Для согласования сигналов ПЛК и тегов Master-SCADA используется OPC-сервер, для этого устанавливаются связи между приходящими с ПЛК параметрами и тегами, которые должны отправляться на другое устройство, работающее по протоколу Modbus RTU. Реализация данного технического решения возможна благодаря разработанному устройству, позволяющему передавать данные от одного сервера к другому. Технически такое устройство представляет собой пару микроконтроллеров, объединённых через USB-hub (см. рис. 2). Каждый микроконтроллер запро-

граммирован на обработку информации, поступающей от соответствующего сервера. Одним из наиболее простых и одновременно надёжных способов коммуникации с Node-RED является интерфейс последовательной передачи данных, который реализован микроконтроллером «МК2». Другой микроконтроллер «МК1» настроен на передачу данных по последовательному интерфейсу с использованием протокола Modbus RTU и обеспечивает связь с OPC-сервером. Между собой микроконтроллеры используют интерфейс последовательной передачи данных. В Node-RED создаётся блок-схема (поток), которая позволяет принимать данные с OPC-сервера и обрабатывать их.

Данная схема способна реагировать на определённые команды, поступающие чат-боту от пользователя, обрабатывать их, находить параметр, соответствующий команде, и отправлять его в ответном сообщении. В настоящее время доступны функции отправки ботом основного экрана SCADA-системы с мнемосхемой как скриншот рабочего стола ОС Windows и отправки текстовых сообщений с показаниями датчиков. Функционал промышленного бота реализуется кодом, написанным на JavaScript. Таким образом, приложения с обеих сторон устройства могут обмениваться данными, что позволяет организовать связь диспетчерского пункта и удалённой станции в обоих направлениях.

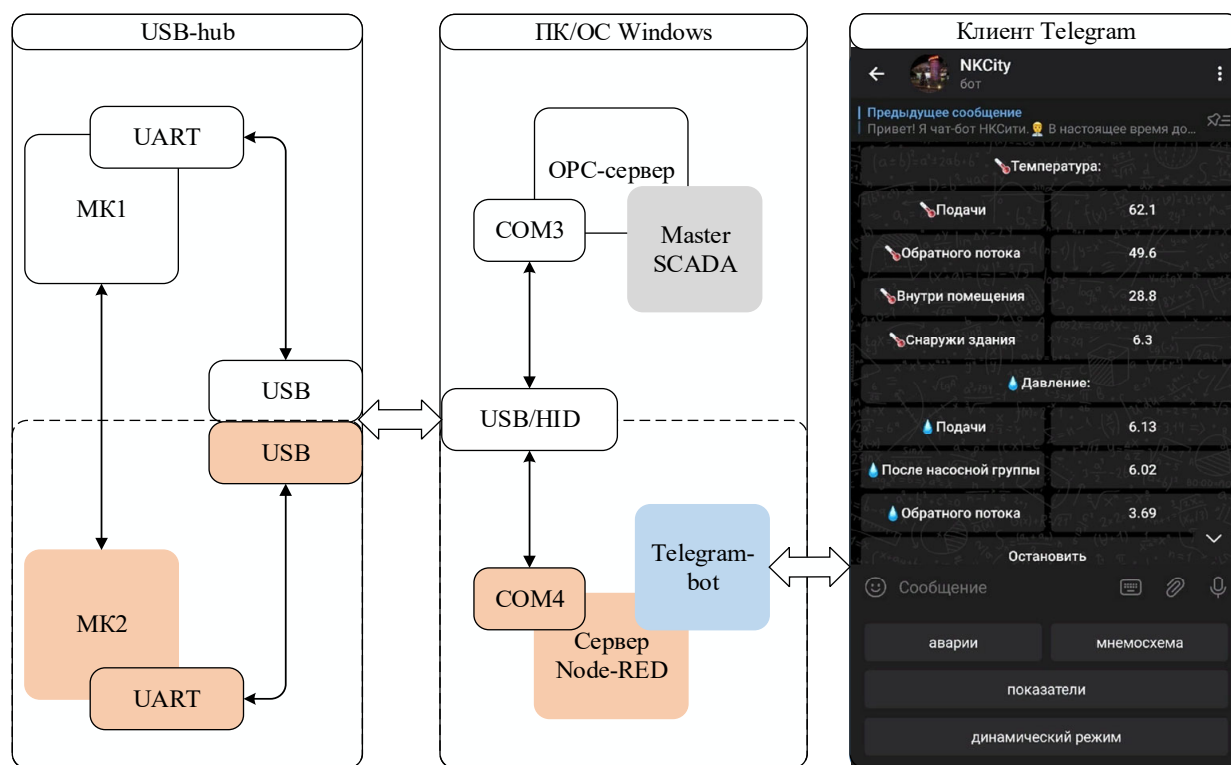


Рис. 2. Функциональная схема обмена данными между SCADA-системой и мессенджером Telegram

Комбинация сервера Node-red и облачного мессенджера Telegram позволяет реализовать передачу информации о работе станции в рамках цифровых технологий IoT. Такой подход обеспечивает доступ к удалённой системе управления, а также экономию мобильного трафика. Предложенное решение позволяет не только выполнять мониторинг, но также предоставляет функции управления. С помощью бота можно осуществлять оперативное управление целевой установкой: изменять уставку по давлению, корректировать коэффициенты регулятора, производить запуск или остановку насосов в ручном режиме.

Другой особенностью такой реализации является возможность представления динамики технологического процесса оператору, т.е. отображение показателей в динамическом режиме. Ди-

наимизация – это основа эргономики операторского интерфейса [6]. Чат-бот предоставляет оператору, управляющему технологическим процессом, графический интерфейс для наглядного динамического отображения хода технологического процесса и выдачи управляющих воздействий с помощью мессенджера. При этом чат-бот может постоянно обновлять как значения в текстовых сообщениях, так и снимок графического интерфейса с элементами мнемосхемы, например, индикаторы и тренды. То есть бот умеет не только отправлять статическое сообщение с параметрами, но и редактировать уже отправленное сообщение и отображать показатели станции в режиме реального времени, как показано на рис. 2. Таким образом, клиент Telegram полностью передаёт панель управления SCADA-системы и становится основным способом представления информации оператору [4] в качестве графического интерфейса пользователя. Другими словами, платформа мессенджера становится новым способом организации АРМ и является новым типом интерфейса в промышленных технических системах автоматического управления (см. рис. 3). Работа в данном режиме предоставляет персоналу возможность быстро реагировать на события, которые происходят на объекте автоматизации и которые зафиксировала система [8].

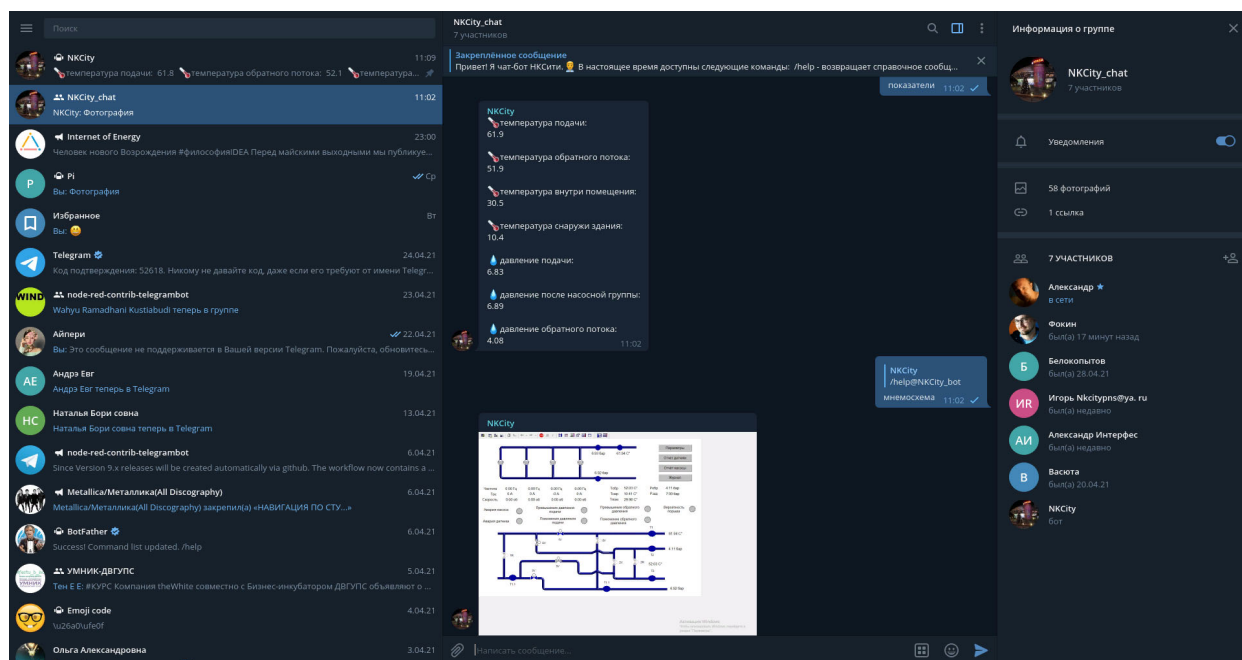


Рис. 3. Клиент Telegram Desktop

К особенностям данного проекта следует отнести интеграцию SCADA-системы с Telegram, который является облачным мессенджером, посредством чат-бота. Такой подход в системах дистанционного диспетчерского контроля технических объектов позволяет получить доступ к системе управления в сети Интернет без необходимости использования статического IP-адреса или сторонних платных облачных сервисов, кроме того, нет необходимости в установке дополнительных приложений, а благодаря кроссплатформенности есть возможность установки клиента Telegram на ПК. Также данная технология позволяет получить информацию о системе в удобном интуитивно понятном интерфейсе мессенджера. Такой подход в действительности превращает мессенджер в систему мониторинга и управления промышленными объектами. То есть облачный мессенджер работает в качестве интерфейса для технологического процесса.

В ближайшем будущем промышленные системы автоматизации и диспетчеризации повсеместно будут оснащаться подобными решениями и связь с любым оборудованием и программным обеспечением будет осуществляться с помощью ботов, установленных непосредственно в машинах, системах автоматического управления и программируемых комплексах. Конечно, сейчас существуют примеры использования Telegram-ботов в сфере домашней автоматизации, но ранее они

не применялись в промышленных системах. В настоящее время это первый случай внедрения чат-бота Telegram для доступа к данным SCADA-системы насосной станции на Дальнем Востоке.

Таким образом, в настоящее время благодаря современным цифровым технологиям стираются границы между социальными сервисами общего назначения и специализированными промышленными техническими системами. При этом их комбинация представляет собой не только новый способ взаимодействия человека с машинами и машин между собой, но также и новый уровень в архитектуре АСУТП (см. рис. 4). Классически выделяют 3 уровня в иерархической структуре АСУТП. Первый уровень – полевой, на котором осуществляется преобразование физических величин и формирование сигналов. На втором уровне осуществляется автоматическое управление и обработка данных по запрограммированному алгоритму. Третий уровень представляет собой информационную систему, реализованную как интерфейс взаимодействия с оператором или автоматизированное рабочее место. Каждый уровень меняет модель представления технологического процесса, вместе с этим меняется и способ взаимодействия человека с системой управления. Новый, четвёртый, уровень в архитектуре промышленной автоматизации позволяет контролировать работу автоматизированных систем на уровне специализированных промышленных ботов в том же формате, что и общение между людьми на понятном человеческом языке. Другими словами, общение ботов технических систем между собой и с операторами происходит на одном и том же разговорном языке в виде сообщений, как и между людьми, что представляет новый способ взаимодействия людей и машин.

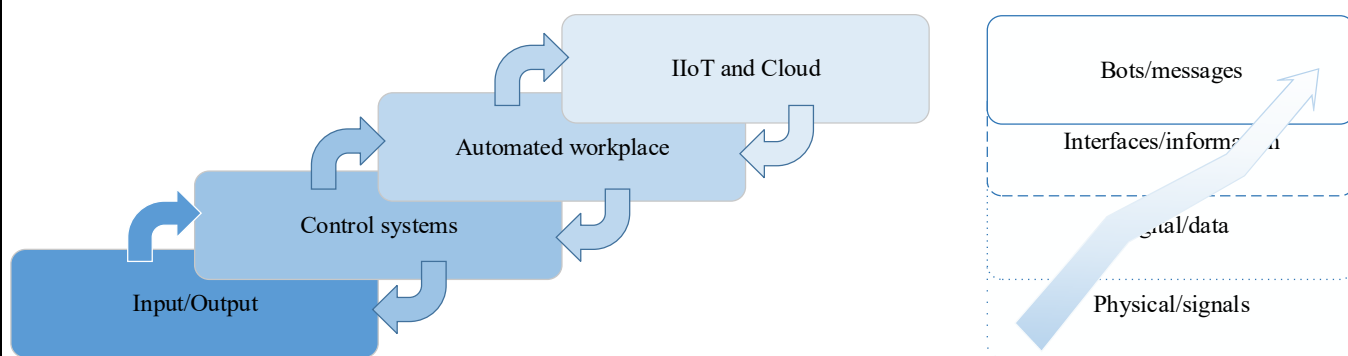


Рис. 4. Концепция IIoT в архитектуре АСУТП

Следующим шагом в развитии данной темы будет реализация сети ботов распределённых АСУ, взаимодействующих как с операторами, так и между собой в одном информационном пространстве и в едином формате, что в итоге приведёт к реализации таких концепций, как Smart City, Smart Factory, Smart Industry и Smart Energy.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Килиди, А. И. Принцип использования типологии насосных станций в мелиоративном строительстве / А. И. Килиди, С. Д. Хилькова, Е. Е. Пяткина // Новая наука: Опыт, традиции, инновации. – 2017. – Т. 2. – № 4. – С. 178-181.
2. Школьная, В. М. К вопросу автоматизации водораспределения на участке канала с применением SCADA-систем / В. М. Школьная, В. Э. Завалюев // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2016. – № 2 (62). – С. 43-48.
3. Билоус, О. А. Описание конфигурирования верхнего уровня автоматизированной системы управления вентиляцией и кондиционированием на базе программируемого логического контроллера и SCADA-системы / О. А. Билоус, Д. В. Шиляев // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 4. – С. 82-84.
4. Пугач, Н. А. Разработка системы автоматизации погрузочного комплекса поверхности шахты / Н. А. Пугач, С. В. Неежмаков, С. В. Дубинин // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: сборник научных трудов XX Международной научно-технической конференции аспирантов и студентов (в

- рамках 6-го Международного научного форума «Инновационные перспективы Донбасса»), Донецк, 26-28 мая 2020 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2020. – С. 174-177.
5. Разработка сетевых проектов. Создание сетевых проектов в MasterSCADA [Электронный ресурс] / InSAT Company, 2000-2013. – Режим доступа: [https://masteropc.insat.ru/files/art\\_step\\_by\\_step/Net\\_Project\\_MasterSCADA.pdf](https://masteropc.insat.ru/files/art_step_by_step/Net_Project_MasterSCADA.pdf) (дата обращения: 18.04.2021).
6. Динамизация в MasterSCADA™. Обзор возможностей [Электронный ресурс] / InSAT Company, 2000-2013. – Режим доступа: <https://insat.ru/metodicheskie-materialy/Динамизация%20элементов%20мнемосхем.pdf> (дата обращения: 18.04.2021).
7. Шиляев, Д. В. Проектирование автоматизированной системы управления вентиляцией и кондиционированием на базе программируемого логического контроллера и релейной логики / Д. В. Шиляев, О. А. Билосус // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 4. – С. 240-243.
8. Зарипова, Р. С. Разработка информационной системы для контроля технологических параметров в среде MasterSCADA / Р. С. Зарипова, Р. Р. Галямов // Аллея науки. – 2017. – Т. 3. – № 15. – С. 346-349.
9. Галеев, С. Р. Информационно-измерительная система технологического контроля параметров Центрального теплового пункта / С. Р. Галеев, Р. С. Зарипова // Энергетика, электромеханика и энергоэффективные технологии глазами молодёжи: материалы IV российской молодёжной научной школы-конференции: в 2 томах, Томск, 01-03 ноября 2016 года / Томский политехнический университет. – Томск: ООО «ЦРУ», 2016. – С. 328-329.
10. Зарипова, Р. С. Разработка информационной системы для контроля технологических параметров в среде MasterSCADA / Р. С. Зарипова, Р. Р. Галямов // Аллея науки. – 2017. – Т. 3. – № 15. – С. 346-349.
11. Epifancev, K. Problems and advantages of SCADA systems when performing measurements at hazardous production technologies / K. Epifancev, T. Mishura // JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies, Krasnoyarsk, 04 March 2020 / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. – Krasnoyarsk, Russia: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2020. – P. 32071.
12. Разработка и моделирование автоматического привода запорной арматуры локализации центробежного насоса / С. Н. Иванов, М. Ю. Сариллов, А. А. Просолович, У. Е. Решетник // Учёные записки Комсомольско-го-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № II-1 (38). – С. 69-75.





Попова О. В., Григорьев Я. Ю., Жарикова Е. П., Григорьева А. Л.  
O. V. Popova, Ya. Yu. Grigoriev, E. P. Zharikova, A. L. Grigorieva

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

### APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS IN PROCESS ASSESSMENT TASKS

**Попова Ольга Владимировна** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: olia.kms@mail.ru.

**Olga V. Popova** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: olia.kms@mail.ru.

**Григорьев Ян Юрьевич** – кандидат физико-математических наук, доцент, проректор по учебной работе Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: jan198282@mail.ru.

**Yan Yu. Grigoryev** – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Vice Rector for Academic Affairs, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: jan198282@mail.ru.

**Жарикова Евгения Павловна** – ведущий программист, ассистент кафедры прикладной математики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: evgenia131094@mail.ru.

**Evgeniya P. Zharikova** – Assistant, Department of Applied Mathematics, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: evgenia131094@mail.ru.

**Григорьева Анна Леонидовна** – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: pm@knastu.ru.

**Anna L. Grigorieva** – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Applied Mathematics, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: pm@knastu.ru.

**Аннотация.** В работе рассматриваются разные подходы к оценке технологических процессов на основе данных, считываемых в разные моменты времени, на разных этапах с учётом влияния входных параметров. Используются модели регрессионного моделирования с применением классических подходов и методов машинного обучения. Производится сравнение полученных решений, определяется необходимость применения методов интеллектуального анализа данных. Рассматриваются модель нейронной сети MLP и метод XGBoost, при обучении используются метрики MAE, MSE.

**Summary.** The paper discusses different approaches to assessing technological processes based on data read out at different points in time, at different stages, taking into account the influence of input parameters. Regression modeling models are used that implement classical approaches and machine learning methods. The comparison of the obtained solutions is made, the necessity of applying the methods of data mining is determined. The MLP neural network model and the XGBoost method are considered, the MAE, MSE metrics are used for training.

**Ключевые слова:** регрессия, нейронные сети, машинное обучение, производственный процесс.

**Key words:** regression, neural networks, machine learning, production process.

УДК 004.048

В настоящее время в производстве задействуется высокотехнологичное оборудование, оснащённое большим количеством различных датчиков, позволяющих получить большой объём данных о реализации технологического процесса. Для анализа и прогнозирования требуется обработка полученной информации. Существуют классические методы оценки статистических данных, к которым относятся методы регрессионного моделирования, имеющие автоматизацию в



различных средах MS Excel, Statistica и т.д. При построении регрессионных зависимостей возможны ситуации, когда вычислительный процесс становится достаточно трудоёмким. Это связано с видом выбранной зависимости и структурой набора данных. При этом полученный результат не всегда обеспечивает достаточную точность. Для решения таких проблем рассматриваются более сложные зависимости, что способствует ещё большему количеству вычислений. Эффективными методами решения такого класса задач являются методы машинного обучения, позволяющие достаточно эффективно обрабатывать большие объёмы информации и хорошо описывающие процессы в рамках диапазонов имеющихся данных.

При рассмотрении производственного процесса можно выделить две группы параметров. К первой группе относятся входные параметры, которые можно разделить на контролируемые и неконтролируемые. Контролируемые параметры могут изменяться пользователем с целью повышения эффективности процесса, неконтролируемые оказывают влияние на процесс, но не могут изменяться оператором. Вторая группа параметров определяет значения на выходе исследуемого процесса. Целями работы являются анализ технологического процесса на основе данных, установление зависимости и определение возможности влияния на результат с помощью изменения параметров.

В работе рассматривается технологический процесс преобразования некоторого вида сырья в конечный полезный продукт с примесями. Данные о процессе формируются на предприятии за заданный период времени с помощью датчиков и замеров, проводимых операторами процесса. Целью исследования является отбор параметров, оказывающих влияние на процесс, изменение которых может способствовать повышению эффективности последнего.

На первом этапе проводится анализ данных классическими методами. Анализ большого количества различных функциональных зависимостей показывает низкое качество разрабатываемых моделей. Ниже приводятся варианты зависимостей с лучшими полученными показателями.

Функции:

$$y = a + b * \ln(x) + \frac{c}{\ln(x)} + \frac{d}{\ln(x)^2} + \frac{e}{\ln(x)^2} + \frac{f}{\ln(x)^3} + \frac{g}{\ln(x)^3} + h * \ln(x)^4$$

( $a = -6\,3100\,614$ ,  $b = -1\,8748\,367$ ,  $c = -1.2026$ ,  $d = -3\,031\,927$ ,  $e = -1.22$ ,  $f = -221\,662.8$ ,  $g = -51\,962\,215$ ,  $h = -3028.43$ ) с коэффициентом детерминации, равным 0,28;

$$y = a + bx^{0.5} + cx + dx^{1.5} + ex^2 + fx^{2.5} + gx^3 + hx^{3.5} + ix^4$$

( $a = 67\,715\,929$ ,  $b = -2.03$ ,  $c = 2.67$ ,  $d = -1.99$ ,  $e = 9.27$ ,  $f = -2.7$ ,  $g = 5.06$ ,  $h = -5.3$ ,  $i = 2.42$ ) с коэффициентом детерминации, равным 0,38.

Подобрать вид функциональной связи, обеспечивающей надёжную зависимость, не представляется возможным. Даже достаточное усложнение вида регрессионной зависимости не позволяет обеспечить высокие значения коэффициента детерминации и допустимые показатели при оценке надёжности с помощью критерия Фишера.

На следующем этапе исследования рассматриваются методы машинного обучения, которые достаточно требовательны к набору исходных данных и позволяют находить хорошие приближения в указанном диапазоне. К этим методам относятся: искусственные нейронные сети (распознавание, кластеризация, прогноз); эволюционное программирование; генетические алгоритмы (оптимизация); ассоциативная память (поиск аналогов, прототипов); нечёткая логика; деревья решений; системы обработки экспертных знаний [9]. Эти методы позволяют лучше описывать соответствующие процессы и имеют возможность динамически адаптироваться к изменению потоков обрабатываемой информации за счёт пополнения обучающей выборки и т.д. Помимо имеющихся преимуществ, они обладают недостатками, связанными с узкой направленностью применения полученных моделей в производственных задачах.

Для построения модели производится подготовка данных. Первоначальный набор данных разделяется случайным образом на обучающую часть (70 %), валидационную (10 %) и тестовую (20 %). Обучающая и валидационная части используются непосредственно в процессе обучения, а

тестовая часть необходима для того, чтобы проверить качество обучения посредством нижеописанных метрик.

Данные для обучения хранятся в csv файле, имеющем разметку, отражённую в табл. 1.

Таблица 1

Разметка csv файла

Время работы ав- токлава, ч	Железо, %	Мышьяк, %	...	Хлориды, г/кг
24	17.3	4.01	...	3.70
24	16.8	4.5	...	4.90
23.9	20.1	7.3	...	8.05

Для решения поставленной задачи методами машинного обучения проводится сравнение качества решения при помощи XGBoost и нейронных сетей.

Рассмотрим метод XGBoost. Он заключается в реализации деревьев решений с градиентным усилением, разработанных для увеличения скорости и производительности. Результаты метрики обученной модели представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты метрик обученной модели XGBoost

Метрика	Значение
MSE	575.65
MAE	15.57
r2	0.97

Приводится вариант решения с применением нейронной сети MLP (multi layer perceptron). Архитектура MLP может содержать один или несколько скрытых слоёв, обеспечивающих уровни абстракции. Прогнозы делаются на выходном слое, называемом видимым (см. рис. 1).

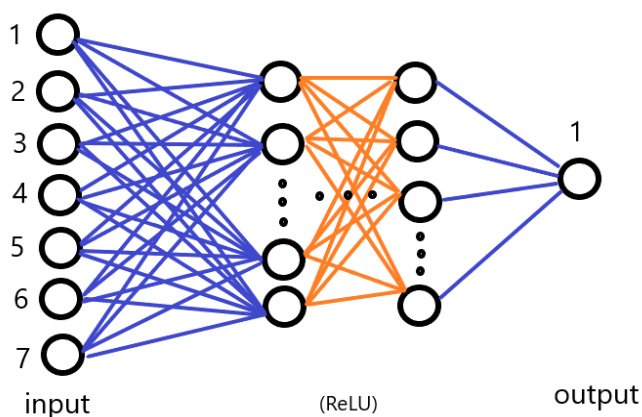


Рис. 1. Архитектура MLP

На входе сети 7 параметров, соответствующих значениям «Fe», «As», «Time» и т.д. Экспериментальным путём определяется функция активации. Лучшие результаты обеспечивает функция ReLU. Определяется функция потерь MSE. Реализуется алгоритм оптимизации Adam (adaptive moment estimation). Обучение производится с размером пакета 512, скоростью обучения 0.0001, со случайной заморозкой 50 % связей на каждой итерации и нормализацией для каждого пакета.

График изменения функции потерь на обучающей и валидационной частях набора данных представлен на рис. 2.

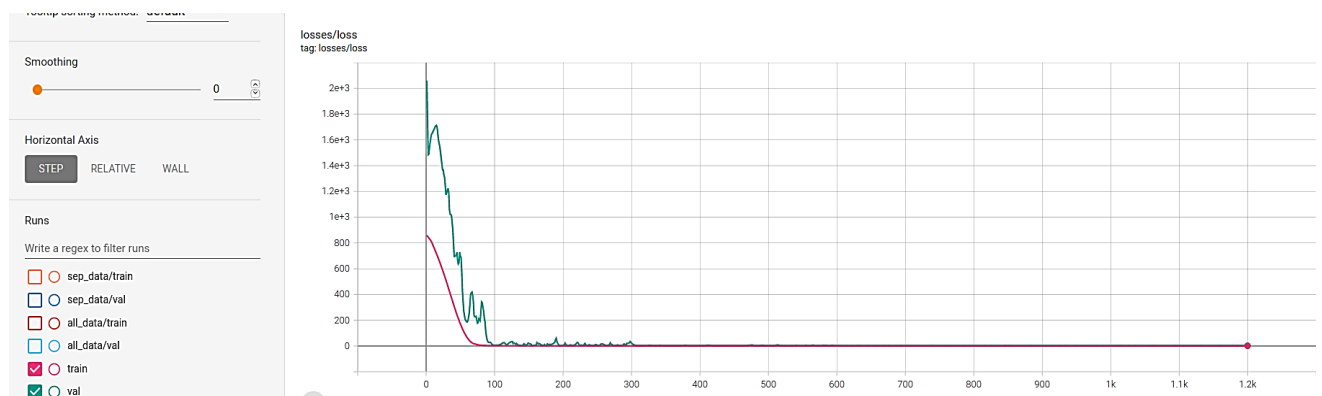


Рис. 2. График изменения функции потерь во время обучения нейронной сети на фактических данных

Результаты метрики обученной модели представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты метрики обученной модели MLP

Метрика	Значение
MSE	1.41
MAE	0.04
r2	0.003

В качестве метрик для анализа качества методов используются MAE и MSE. MAE (Mean Absolute Error) измеряет среднюю сумму абсолютной разницы между фактическим значением и прогнозируемым значением:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |e_t|, \quad \text{где } e_t = original_t - predict_t.$$

MSE (Mean Squared Error) измеряет среднюю сумму квадратной разности между фактическим значением и прогнозируемым значением для всех точек данных:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2, \quad \text{где } e_t = original_t - predict_t.$$

Исследование показывает, что использование нейронной сети даёт более качественный результат на заданном диапазоне значений и обеспечивает возможность решения поставленной задачи. Сравнительные данные представлены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнительная таблица значений метрик методов MLP и XGBoost

Метрика	Метод	
	MLP	XGBoost
MSE	1.41	575.65
MAE	0.04	15.57
r2	0.003	0.97



**Вывод.** В результате исследования, проводимого на наборе данных, представленных предприятием, реализующим конкретный технологический процесс, была показана эффективность применения нейронных сетей в сравнении с классическими методами и рядом других методов машинного обучения (XGBoost при оценках эффективности методов, базирующихся на метриках MSE и MAE) при поиске решений высокой точности на заданном рабочем диапазоне. Увеличение выборки и добавление данных может способствовать выявлению других альтернатив.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Обеспечение информационной безопасности при решении задач мониторинга подстилающей поверхности с помощью беспилотных летательных аппаратов / Е. П. Жарикова, И. А. Трещев, Я. Ю. Григорьев, А. Л. Григорьева // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 4-8.
2. Челухин, В. А. Применение математических моделей в информационных технологиях / В. А. Челухин, В. А. Абрамсон // Материалы I Международной научно-практической конференции молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021. – С. 117-120.
3. Амосов, О. С. Использование генетического алгоритма для настройки глубоких нейронных сетей в задачах классификации компьютерных атак / О. С. Амосов, С. Г. Амосова, Д. С. Магола // Информатика и системы управления. – 2020. – № 4 (66). – С. 104-117.
4. Исследование архитектур глубоких нейронных сетей со сверточными и рекуррентными слоями для задач распознавания аномалий сетевого трафика в компьютерных системах / О. С. Амосов, С. Г. Амосова, Ю. С. Иванов, С. В. Жиганов // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2019): материалы двенадцатой международной конференции / под общ. ред. С. Н. Васильева, А. Д. Цвиркуна. – М.: Международный научно-исследовательский институт проблем управления РАН, 2019. – С. 995-1005.
5. Амосов, О. С. Оценивание случайных последовательностей с использованием нечётких систем и кластеризации / О. С. Амосов, Д. С. Магола, Е. А. Малашевская // Информатика и системы управления. – 2012. – № 1 (31). – С. 146-155.
6. Khanghah, E. R. Study of the relationship between overinvestment, leverage, and liquidity in companies listed in tehran stock exchange / E. R. Khanghah, B. Partovi // Revista Genero & Direito. – 2020. – № 9 (2). – P. 558-572.
7. Pivnicka, K. Fish species-diversity in small Czech and Moravian streams / K. Pivnicka, J. Poupe; M. Svatora // Zivocisna Vyroba. – 1995. – № 40 (4). – P. 177-180.
8. Андрейчиков, А. З. Интеллектуальные информационные системы / А. З. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 424 с.
9. Бардин, А. К. Особенности оценки эффективности производственных процессов при их дифференциации / А. К. Бардин, В. Е. Сайкинов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – № 124. – С. 1493-1504.
10. Zharikova, E. P. Applications of computer vision in cross-sectoral tasks / E.P. Zharikova, Y.Y. Grigoriev, A. L. Grigorieva // Lecture notes in networks and system. – 2021. – № 200. – P. 415-426.
11. Математическое моделирование процесса получения энергии при использовании перепада температур день-ночь на основе нейронных сетей и искусственного интеллекта / В. А. Челухин, М. А. Кружаев, Пей Зон Аунг, Е. В. Абрамсон // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 18-24.

**Марьин С. Б., Щербатюк Г. А., Кириллин В. Д., Пак М. И.**  
**S. B. Maryin, G. A. Scherbatyuk, V. D. Kirilin, M. I. Pak**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДАЧИ СРЕДНЕЙ ЧАСТИ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ С ПОДПОРОМ**

**INVESTIGATION OF DISTRIBUTION PROCESS OF THE MIDDLE PART OF THE PIPE BILLET WITH BACKUP**

**Марьин Сергей Борисович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Авиационное» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: maryinsb@mail.ru.

**Sergey B. Maryin** – D.Sc. in Engineering, Head of Aircraft Industry Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: maryinsb@mail.ru.

**Щербатюк Галина Анатольевна** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Авиационное» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: scherbatyuk.ga@yandex.ru.

**Galina A. Scherbatyuk** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Aircraft Industry Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: scherbatyuk.ga@yandex.ru.

**Кириллин Вячеслав Дмитриевич** – студент кафедры «Авиационное» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kirilinslavik@gmail.ru.

**Vyacheslav D. Kirilin** – Student, Aircraft Industry Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kirilinslavik@gmail.ru.

**Пак Мария Ивановна** – студент кафедры «Авиационное» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: masha.pak.98@mail.ru.

**Maria I. Pak** – Student, Aircraft Industry Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: masha.pak.98@mail.ru.

**Аннотация.** В статье исследован процесс изготовления муфты термомеханического соединения для гидрогазовых систем летательных аппаратов. В качестве материала для изготовления элементов труб летательных аппаратов использовались алюминиевые сплавы АМг, АМц, титановый сплав ОТ-4 и сталь 12Х18Н10Т.

**Summary.** The article investigates the process of manufacturing a thermomechanical coupling by a distribution method with a backup. Aluminum alloys AMg, AMc, titanium alloy OT-4 and steel 12X18N10T were used as the material for the manufacture of aircraft tube elements.

**Ключевые слова:** трубная заготовка, скорость перемещения, гидрогазовая система, раздача, герметичность, осесимметричная деталь, жёсткая матрица.

**Key words:** pipe billet, speed of movement, hydro-gas system, distribution, tightness, axisymmetric part, rigid matrix.

УДК 621.98.044.7

В гидрогазовых системах летательных аппаратов широко применяются осесимметричные детали из трубных заготовок в виде патрубков, муфт, законцовок, изготавливаемых способом раздачи внутренним давлением наполнителя [2]. В качестве материала для изготовления элементов труб летательных аппаратов широко используют алюминиевые сплавы АМг, АМц, титановый



сплав ОТ-4 и сталь 12Х18Н10Т [3]. К деталям трубопроводов предъявляются высокие эксплуатационные требования по прочности, точности и герметичности, однако такие дефекты, как утонение и волнистость стенок, возникающие в процессе их производства, значительно снижают работоспособность деталей. В таких условиях очень важной задачей является моделирование процесса изготовления деталей из трубных заготовок, что позволяет определить и оценить параметры напряжённо-деформированного состояния.

**Постановка задачи.** Штамп содержит жёсткую матрицу, установленную в жёстком корпусе, основание, пуансон. В матрице размещена трубная заготовка, внутри которой находится рабочее тело (эластомер).

Штамп работает следующим образом. Посредством перемещения ползуна пресса с усилием  $P$  перемещается пуансон. От пуансона усилие  $P$  передаётся через рабочее тело в зону деформирования трубной заготовки, в результате чего происходит раздача средней части трубы [5]. Затем пуансон поднимают вверх, производят разборку матрицы и выемку готовой детали с рабочим телом. На рис. 1 приведено устройство для раздачи трубной заготовки с подпором.

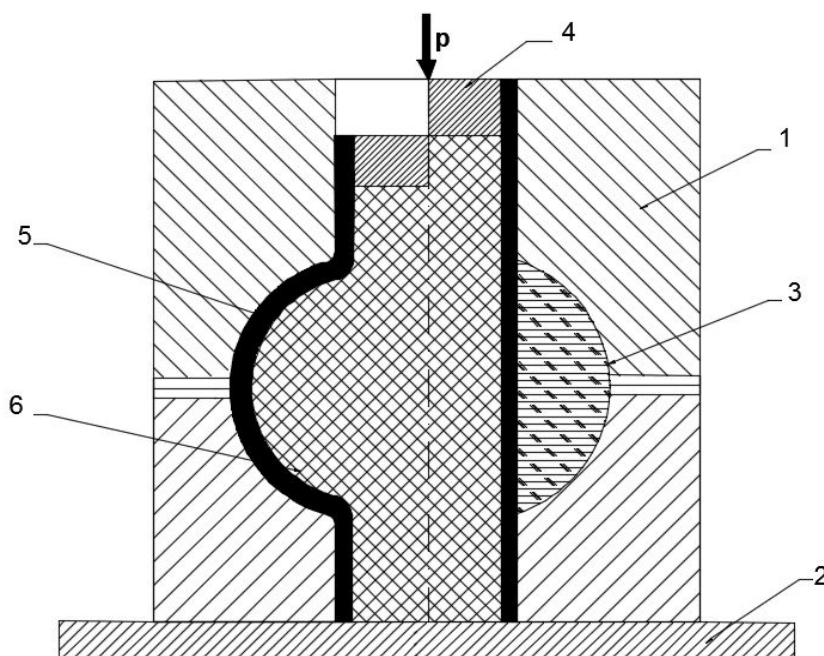


Рис. 1. Устройство для раздачи трубной заготовки с подпором:  
1 – жесткая матрица; 2 – основание; 3 – подпор (лёд); 4 – пуансон;  
5 – трубная заготовка; 6 – рабочее тело (эластомер)

Трубная заготовка внутренним радиусом  $R_0$ , толщиной стенки  $S$  (область I) помещается в жёсткую матрицу сложной конфигурации (область II). С наружной части трубы в полости матрицы (область III) размещается несжимаемая среда. На рис. 2 приведено меридиональное сечение с учётом осевой симметрии процесса.

Во внутренней части трубной заготовки (область IV) создаётся гидростатическое давление  $P$  [1]. При этом материал трубы деформируется, наружный радиус в средней части трубной заготовки изменяется до  $R_1$ . В ходе деформирования заготовки I среда III создаёт противодействие и постепенно удаляется из полости матрицы II через зазор шириной  $2d$  (см. рис. 2).

В данном случае имеется двухкомпонентная система: трубная заготовка I – несжимаемая среда III [4; 6; 7; 8].

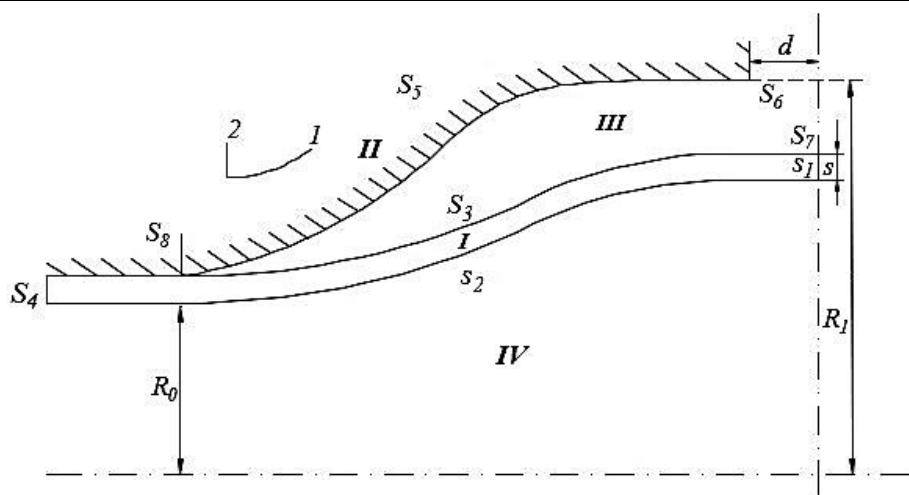


Рис. 2. Схема деформирования трубной заготовки

Рассматриваем осесимметричное тело вращения. В эйлеровой системе координат исследуемый процесс описывается системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij,j} &= 0; \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2\lambda \xi_{ij}; \lambda = \frac{T}{H} \\ T &= T(\varepsilon, \xi^*, \theta), H = \sqrt{\xi_{ij} \xi_{ij}} \\ \xi_{ii} &= 0, \xi_{ij} = \frac{1}{2}(V_{i,j} + V_{j,i}) \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

Граничные условия задачи:

$$\begin{aligned} V_1|_{S_1, S_7} &= 0; V_2|_{S_5, S_8} = 0; \sigma_{11}|_{S_4} = 0; \\ \sigma_{12}|_{S_1, S_4} &= 0; \sigma_{22}|_{S_6} = 0; \sigma_{21}|_{S_6} = 0; \\ \sigma_{22}|_{S_2} &= -P. \end{aligned} \quad (2)$$

Закон трения на контактных поверхностях  $S_3$  и  $S_8$  (см. рис. 2) примем в виде

$$\sigma_{21}|_{S_i} = -\psi_i \tau_s \frac{(v_{\text{СК}})_i}{|v_1^*|}, \quad i = 3, 8, \quad (3)$$

где  $\psi_i$  – коэффициенты трения;  $(v_{\text{СК}})_3$  и  $(v_{\text{СК}})_8$  – скорости скольжения материала трубной заготовки относительно несжимаемой среды и матрицы соответственно;  $v_1^*$  – нормирующая скорость трубной заготовки.

**Результаты решения для стальной заготовки.** На рис. 3-5 представлены результаты расчёта параметров напряжённо-деформированного состояния для трубных заготовок согласно аналитическим зависимостям (1)-(3). При расчёте принималось:  $s = 2$  мм,  $d = 3$  мм,  $R_0 = 21,5$  мм,  $R_1 = 34$  мм,  $P = 70$  МПа. Материал трубной заготовки – сталь 12X18H10T.

На рис. 3 представлены эпюры скоростей перемещений  $V_1, V_2$  по шагам. На начальной стадии деформирования трубной заготовки (см. рис. 3, а) минимум по скоростям  $V_2$  наблюдается в торцевой части заготовки (поверхность  $S_8$  на рис. 2), а максимальные значения скорости  $V_2$  принимают в средней части трубной заготовки на поверхности  $S_2$  (см. рис. 2), и они равны 1,26 мм/с.

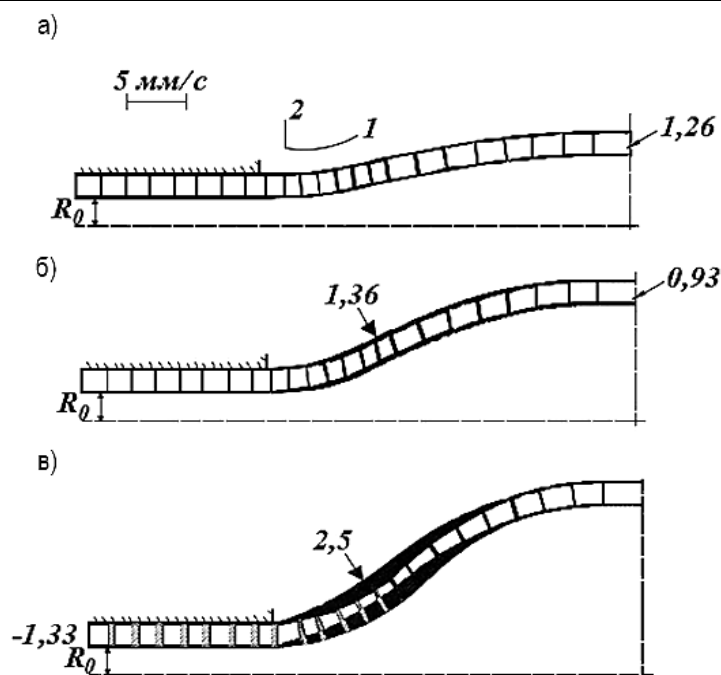


Рис. 3. Эпюры скоростей перемещений  $V_1, V_2$  по стадиям деформирования заготовки ( $P = 70$  МПа,  $d = 3$  мм): а – начальная стадия деформирования; б – промежуточная стадия деформирования; в – конечная деформирования

На конечной стадии деформирования заготовки (см. рис. 3, в) скорости  $V_1$  направлены в противоположную сторону к положительному направлению оси 1 и на поверхности  $S_4$  (см. рис. 2) принимают максимальное значение, которое равно 1,33 мм/с.

Максимальные значения скоростей  $V_2$  наблюдаются в средней части рассматриваемой области. Они равны: на промежуточной стадии деформирования заготовки (см. рис. 3, б) 1,36 мм/с, на конечной стадии 2,5 мм/с.

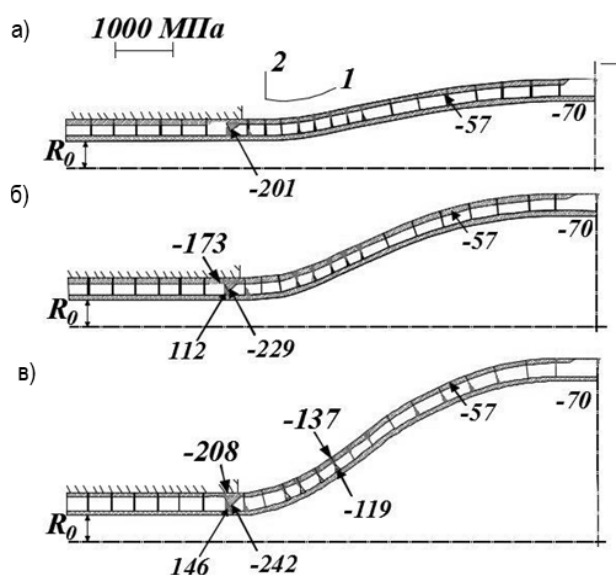


Рис. 4. Эпюры нормальных напряжений  $\sigma_{11}, \sigma_{22}$  по стадиям деформирования заготовки ( $P = 70$  МПа,  $d = 3$  мм): а – начальная стадия деформирования; б – промежуточная стадия деформирования; в – конечная деформирования

На рис. 4 представлены эпюры нормальных напряжений  $\sigma_{11}$  и  $\sigma_{22}$  по шагам. В средней части рассматриваемой области  $\sigma_{11}$  переменные, причём на выходе из прямолинейного участка трубной заготовки имеем растягивающие напряжения у поверхности  $S_2$  (см. рис. 2), вблизи внутренней стенки, в то время как у поверхности  $S_3$  присутствуют сжимающие напряжения  $\sigma_{11}$ . Далее картина меняется, т.е. у поверхности  $S_2$  имеем сжимающие напряжения  $\sigma_{11}$ , а на внешней стенке заготовки (поверхность  $S_3$  на рис. 2) – растягивающие.

Максимальные значения растягивающих напряжений  $\sigma_{11}$  принимают у поверхности  $S_2$  – на выходе из прямолинейного участка трубной заготовки. И они равны на конечной стадии деформирования заготовки (см. рис. 4, в) 146 МПа. Сжимающие напряжения  $\sigma_{11}$  максимальные значения принимают у поверхности  $S_3$  на выходе из прямолинейного участка трубной заготовки и соответственно равны: на промежуточной стадии деформирования заготовки (рис. 4, б) 173 МПа, на конечной стадии (рис. 4, в) 208 МПа.

Наиболее опасным является средний участок рассматриваемой области, где на промежуточной (см. рис. 4, б) и конечной (см. рис. 4, в) стадиях деформирования трубной заготовки у внешней стенки (поверхность  $S_3$  на рис. 2) имеют место значительные растягивающие напряжения  $\sigma_{11}$ .

Нормальные напряжения  $\sigma_{22}$  на всех стадиях деформирования трубной заготовки во всей рассматриваемой области являются сжимающими и принимают максимальные значения на поверхности  $S_3$  на выходе из прямолинейного участка трубной заготовки. На конечной стадии деформирования заготовки (см. рис. 4, в)  $\sigma_{22}$  достигают значения 242 МПа.

На рис. 5 представлены эпюры нормальных напряжений  $\sigma_{33}$ . По результатам расчётов видно, что на всех стадиях деформирования заготовки на прямолинейном участке имеем сжимающие напряжения  $\sigma_{33}$ , которые на конце прямолинейного участка принимают максимальные значения, которые соответственно равны: на начальной стадии деформирования (см. рис. 5, а) 157 МПа, на промежуточной (см. рис. 5, б) 188 МПа и на конечной стадии (рис. 5, в) 216 МПа.

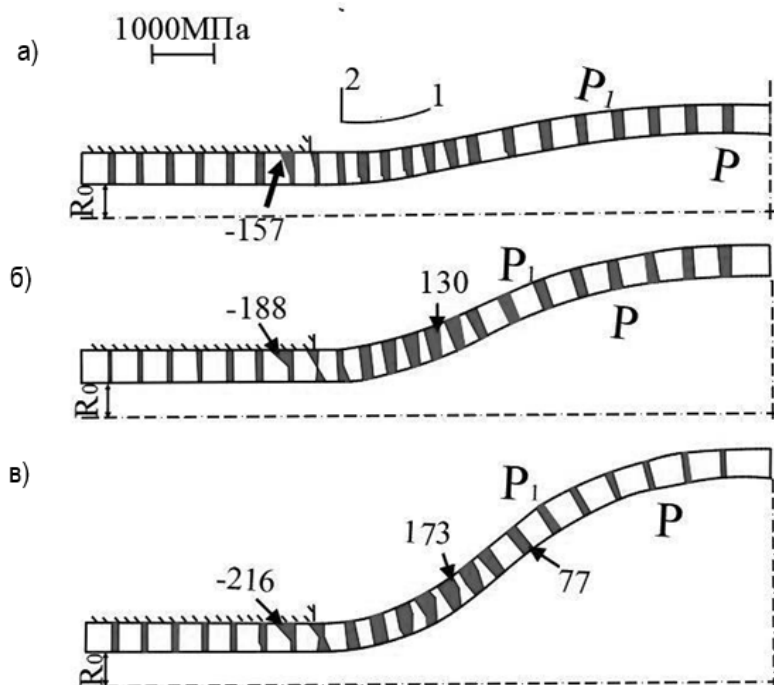


Рис. 5. Эпюры нормальных напряжений  $\sigma_{33}$  по стадиям деформирования заготовки ( $P = 70$  МПа,  $P_1 = 57$  МПа,  $d = 3$ ): а – начальная стадия деформирования; б – промежуточная стадия деформирования; в – конечная стадия деформирования

Далее вдоль трубной заготовки напряжения  $\sigma_{33}$  меняют знак и становятся растягивающими. Однако в области, непосредственно примыкающей к поверхности  $S_1$  (см. рис. 2), по стадиям деформирования трубной заготовки наблюдается заметное уменьшение значений растягивающих напряжений  $\sigma_{33}$ . Растягивающие напряжения  $\sigma_{33}$  принимают максимальные значения в средней части рассматриваемой области. На конечной стадии деформирования трубной заготовки они равны 173 МПа. В работе также были выполнены эксперименты и изготовлены образцы деталей, показанные на рис. 6.



Рис. 6. Детали, изготовленные из сплавов: а – сталь 12Х18Н10Т;  
б – титан ОТ-4; в – алюминиевый сплав АМГ6М

**Вывод.** Наиболее опасной является средняя часть рассматриваемой области, где имеются значительные растягивающие напряжения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ловизин, Н. С. Математическое моделирование процесса раздачи трубы гидростатическим давлением в средней её части с подпором / Н. С. Ловизин // Обзорение прикладной и промышленной математики: симпозиум по прикладной и промышленной математике: тезисы докладов. – М: ОПиПМ, 2002. – Т. 9. Вып. 1. – С. 219-220.
2. Сравнительный анализ технологических методов раздачи трубчатой заготовки / С. Б. Марьин, Д. А. Потянихин, В. А. Пхьо, Ко. Х. Мин // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2020. – № 10 (106). – С. 4.
3. Исследование совмещённых процессов при изготовлении деталей летательных аппаратов / Б. Н. Марьин [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № II-1 (26). – С. 34-41.
4. Одинокое, В. И. О конечно-разностном представлении дифференциальных соотношений теории пластичности / В. И. Одинокое // Прикладная механика. – 1985. – Т. 21. – № 1. – С. 97-102.
5. Пхьо, В. А. Различные типы рабочих тел для передачи давления при раздаче трубных заготовок / В. А. Пхьо, С. Б. Марьин // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 47-й научно-технической конференции студентов и аспирантов / отв. ред. Э. А. Дмитриев. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2017. – С. 903-906.
6. Maryin S. B. Working body for deformation of thin-walled pipe billets. Maryin S. B., Aung P. W. Materials Science Forum. 2018. T. 945 MSF. P. 628-633.
7. Soe K. Z. Identification of limiting deep drawing ratio using the energy criterion of fracture / Soe K. Z., Feoktistov S. I.: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. P. 12041.
8. Feoktistov S. I. Method for construction of forming limit diagram by using reference mechanical characteristics of the metal / Feoktistov S. I., Soe K. Z. Materials Science Forum. 2018. T. 945 MSF. P. 833-838.



**Кравченко Е. Г., Отряскина Т. А., Шершнёв А. А.**  
**E. G. Kravchenko, T. A. Otryaskina, A. A. Shershnev**

## **ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

### **QUALITY ASSESSMENT OF ENGINEERING PRODUCTION PROCESSES**

**Кравченко Елена Геннадьевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ek74@list.ru.

**Elena G. Kravchenko** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ek74@list.ru.

**Отряскина Татьяна Александровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: knastu2000@mail.ru.

**Tatyana A. Otryaskina** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: knastu2000@mail.ru.

**Шершнёв Алексей Александрович** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Alexey A. Shershnev** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** Применение типовых квалиметрических подходов для оценки качества промышленной продукции не даёт достоверных результатов при анализе качества технологических процессов, поскольку при их протекании происходит ряд динамических изменений, измерение которых существующими методиками даёт лишь приблизительную оценку. При этом не учитывается, что изменение одних показателей качества при осуществлении технологического процесса может быть скорректировано изменением других показателей. Разработана методика оценки качества технологических процессов, отличительной особенностью которой является применение безразмерного обобщённого показателя, учитывающего совокупность его характеристик (технических, экономических, эргономических и др.), а также использование подхода, базированного на оценке процессов по шкале значимости Харрингтона.

**Summary.** The use of typical qualimetric approaches for assessing the quality of industrial products does not give reliable results in analyzing the quality of technological processes, since during their course there are a number of dynamic changes, the measurement of which by existing methods gives only an approximate estimate. It does not take into account that the change in some quality indicators in the implementation of the technological process can be corrected by the change in other indicators. A methodology for assessing the quality of technological processes has been developed, a distinctive feature of which is the use of a dimensionless generalized indicator that takes into account the set of its characteristics (technical, economic, ergonomic and others), as well as the use of an approach based on the assessment of processes on the Harrington significance scale.

**Ключевые слова:** технологические процессы машиностроительного производства, показатели качества, критерии оценки качества, функция желательности, шкала значимости.

**Key words:** engineering production processes, quality indicators, quality assessment criteria, desirability function, significance scale.

УДК 336.27

#### **Введение**

Качество любой промышленной продукции является комплексным понятием и определяется целым рядом критериев, важнейшим из которых является уровень качества технологического процесса. В свою очередь, высокое качество технологического процесса достигается уровнем ка-



чества лежащей в его основе технологической системы, систем контроля и управления, применяемых технологий, инфраструктурой производства, включая обслуживающий персонал.

При оценивании качества технологических процессов необходимо учитывать особенности применяемой технологической системы. При использовании одинаковых материалов и технологий процессы в различных технологических потоках могут протекать с различными показателями точности и устойчивости, поэтому возникает необходимость введения показателя, учитывающего свойства технологической системы и позволяющего оценить вероятность осуществления технологических операций в контролируемых условиях, соответствующих технологическому регламенту и гарантирующих выпуск качественной продукции.

#### Методика оценки качества технологического процесса

Анализ существующих стандартных методик оценки качества технологического процесса [1–4] показал, что функция желательности Харрингтона [5; 6] является самым оптимальным методом определения отклика – обобщённого показателя уровня качества технологических процессов. При построении функции Харрингтона необходимо произвести конвертирование натуральных значений от частных откликов в безразмерную шкалу.

В соответствии с классификацией шкала желательности относится к классу психофизических (субъективных) шкал и предназначена для выявления тождественности между физическими и нефизическими характеристиками оцениваемого технологического процесса. При этом отклики, характеризующие протекание самого технологического процесса, являются его физическими параметрами, а экспертные оценки желательности значения отклика – нефизическими.

Существующие стандартные таблицы тождественности (соответствия) [1; 5; 6], в которых представлены соотношения желательности в числовой и эмпирической системах, можно идентифицировать как готовые шкалы желательности.

По определению [1], функция желательности ( $d$ ) рассматривается в качестве значения частного отклика, переведённого в безразмерную шкалу. Анализируя данные, представленные в табл. 1, можно сделать вывод, что желательности «очень хорошо» соответствует оценка по шкале желательности  $1 \geq d \geq 0,8$ , а желательности «очень плохо» –  $0 \leq d \leq 0,2$  и т.д.

Таблица 1

Стандартные оценки по шкале желательности

Желательность	Оценка по шкале желательности	Значения желательностей	Кодированные значения для стандартной кривой по шкале желательности
		$d$	$y^j$
Очень хорошо	0,81 – 1,00	1,00	3,00
Хорошо	0,64 – 0,80	0,80	1,50
Удовлетворительно	0,38 – 0,63	0,63	0,85
Плохо	0,21 – 0,37	0,37	0,00
Очень плохо	0,00 – 0,20	0,20	–0,50
		0,00	–3,00

Рекомендовано применять следующие виды диапазонов существования частных откликов:

- односторонние ( $y_n \leq y_{\max}$  или  $y_n \geq y_{\min}$ );
- двусторонние ( $y_{\min} \leq y_n \leq y_{\max}$ ).

Если наблюдается одностороннее ограничение, то к числу параметров относятся следующие характеристики качества технологического процесса: ремонтпригодность, сохраняемость, долговечность, работоспособность. И для указанных значений свойств ограничение имеет вид  $y_n \geq y_{\min}$ .

Ещё один диапазон одностороннего ограничения  $y_n \leq y_{\max}$  применим для таких характеристик технологического процесса, как степень загрязнения окружающей среды, уровень шума, взрывобезопасность, уровень токсичности и ряд других подобных.

Обобщённая функция желательности ( $D$ ) вычисляется как среднее геометрическое из частных функций предпочтительности  $d$ , при этом необходимо учитывать весомость каждого свойства:

$$D = \sqrt[n]{\prod_{u=1}^n d_u^{\beta_u}}, \quad (1)$$

где  $n$  – число свойств технологического процесса;  $\beta_u$  – коэффициент весомости свойства технологического процесса;  $u$  – номер свойства в ранжированной последовательности свойств.

При проведении экспертной оценки рекомендовано руководствоваться мнением нескольких специалистов [2]. При обобщении ряда оценок, установленных экспертами, необходимо использовать метод ранговой корреляции [1; 3; 4].

Преобразование натуральных значений показателей качества ( $y$ ) в частную безразмерную шкалу желательности ( $d$ ) осуществляется по формуле [5; 6]

$$d = (e^{-e})^{-y}, \quad (2)$$

где  $y$  – кодированное, взятое в условном масштабе значение частного показателя.

На основании экспертных оценок уровень качества технологического процесса рекомендовано определять по критериям, представленным в табл. 2.

Таблица 2

Критерии при оценивании качества технологического процесса

$y_n$	Свойства показателей качества ТП (частный отклик)	Определение свойств	Критерии
1	2	3	4
$y_1$	Точность	Точность – свойство обеспечивать близость действительных значений параметров технологического процесса к нормируемым их значениям. $Km$ характеризует степень соответствия поля рассеяния контролируемого параметра полю допуска на этот параметр. Процесс считается точным, если коэффициент точности $Km < 1$ , т.е. поле рассеяния контролируемого параметра должно быть меньше поля допуска на этот параметр. Если $Km > 1$ , то процесс признаётся неточным (есть вероятность появления брака)	$0 \leq y_n \leq 1$
$y_2$	Стабильность	Стабильность – это свойство технологического процесса, обуславливающее постоянство распределений вероятности его параметров в течение некоторого интервала времени без вмешательства извне. А при $0 < Kc < 0,5T$ процесс считается стабильным и необходимы только предупреждающие действия. Технологический процесс считается стабильным при $Kc \rightarrow 1$	$0 \leq y_n \leq 1$
$y_3$	Материалоёмкость	Материалоёмкость изделия определяется общей массой его конструкции в килограммах	$0 \leq y_n, \text{ кг}$



Продолжение табл. 2

1	2	3	4
$y_4$	Технологическая трудоёмкость	Технологическая трудоёмкость процесса определяется на основе технически и экономически аргументированной суммы норм рабочего времени выполнения входящих в него технологических операций	$0 \leq y_n$ , норм/ч
$y_5$	Производительность	Производительность – это свойство технологического процесса обеспечивать выпуск заданного количества деталей, сборочных единиц или изделий в единицу времени	$0 \leq y_n \leq 100$ , %
$y_6$	Долговечность	Свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта	$0 \leq y_n \leq 100$ , %
$y_7$	Безотказность	Свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или некоторой наработки	$0 \leq y_n \leq 1$
$y_8$	Ремонтопригодность	Свойство объекта, заключающееся в приспособленности к предупреждению и обнаружению причин возникновения отказов, повреждений и поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путём проведения технического обслуживания и ремонта	$0 \leq y_n \leq 100$ , %
$y_9$	Сохраняемость	Свойство объекта сохранять значения показателей безотказности, долговечности и ремонтопригодности в течение и после хранения или транспортирования	$0 \leq y_n \leq 100$ , %
$y_{10}$	Вероятность безотказной работы	Вероятность того, что в пределах заданной наработки опасный отказ системы не возникает	$0 \leq y_n \leq 1$
$y_{11}$	Себестоимость изготовления продукции	Себестоимость изготовления продукции складывается из всех затрат (материальных и трудовых) предприятия, необходимых для изготовления и реализации продукции, в денежном выражении	$0 \leq y_n$ , р.
$y_{12}$	Коэффициент применяемости	Отношение количества наименований типоразмеров унифицированных, заимствованных, стандартных деталей к общему количеству наименований типоразмеров деталей в изделии	$0 \leq y_n$ , %
$y_{13}$	Коэффициент взаимной унификации для групп изделий	Отношение количества наименований типоразмеров унифицированных деталей к общему количеству наименований типоразмеров деталей в изделии	$0 \leq y_n$ , %
$y_{14}$	Уровень шума	Уровень, который не вызывает у человека значительного беспокойства и существенных изменений показателей функционального состояния систем и анализаторов, чувствительных к шуму	$50 \leq y_n \leq 110$ , дБ

Для комплексного оценивания качества технологического процесса экспертным методом определены следующие обобщённые показатели:

1. Учитывающие технологические свойства:

$$D_1 = \sqrt[4]{d_1 + d_2 + d_3 + d_4};$$

2. Учитывающие свойства назначения:

$$D_2 = d_5;$$

3. Учитывающие свойства надёжности:

$$D_3 = \sqrt[4]{d_6 + d_7 + d_8 + d_9};$$

4. Учитывающие свойства безопасности:

$$D_4 = d_{10};$$

5. Учитывающие экономические свойства:

$$D_5 = d_{11};$$

6. Учитывающие свойства стандартизации и унификации:

$$D_6 = \sqrt[2]{d_{12} + d_{13}};$$

7. Учитывающие эргономические и эстетические свойства:

$$D_7 = d_{14}.$$

Графический метод перевода расчётных значений показателей в натуральные значения откликов основан на идее построения графика зависимости безразмерных и натуральных показателей.

Для практической реализации предложенного подхода функцию желательности рекомендовано использовать в качестве номограммы, с помощью которой оперативно и с высокой информативностью можно определить значение отклика  $y'$  для каждого кодированного значения частного показателя  $y_i$  (см. рис. 1).

Выбор вида кривой желательности обусловлен её неоспоримыми преимуществами. Среди них можно выделить такие, как непрерывность, монотонность, гладкость. Данный выбор основывается на результатах экспертных наблюдений. Суть графического метода оценки качества технологического процесса на основе функции желательности (см. рис. 1) приведена ниже.

По оси ординат расположены значения желательности в интервале от 0 до 1. На ось абсцисс в условном масштабе нанесены значения отклика  $y'$ . Началом отсчёта горизонтальной оси считается значение, соотносимое с желательностью, равной 0,37. Выбор данного значения аргументируется тем фактом, что эта точка является экстремумом функции желательности, что значительно облегчает вычисления.

Ось  $Y'$  – кодированная шкала, на которой симметрично относительно нуля отмечены кодированные значения откликов  $y'$ . Условно приведённая шкала разбита на три интервала. При этом выбранное количество интервалов определяет крутизну функции желательности в середине кривой. Поскольку основное назначение функции желательности – это перевод кодированных значений откликов в безразмерный параметр, то теоретически она полностью удовлетворяет поставленной задаче.

Идентифицированные шкалы откликов  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$  произвольно прокалиброваны в точках, приведённых в табл. 1, и расположены параллельно кодированной шкале  $Y'$ . Полученная в результате этих преобразований шкала желательности относится к числу неравномерных. Алгоритм вычисления величины частной желательности информативен и прост:

1. Для получения значения величины частной желательности  $d_{1j}$  нужно спроецировать точку конкретного числового значения  $Y_{1j}$  на шкалу  $Y_1$ .

2. Затем перенести полученное значение  $Y_{1j}$  на график функции желательности и определить соответствующее значение  $d_{1j}$  по оси ординат (шкале частной желательности  $d$ ).

Уровень точности проведённых преобразований считается достаточным для поставленной измерительной задачи [1].



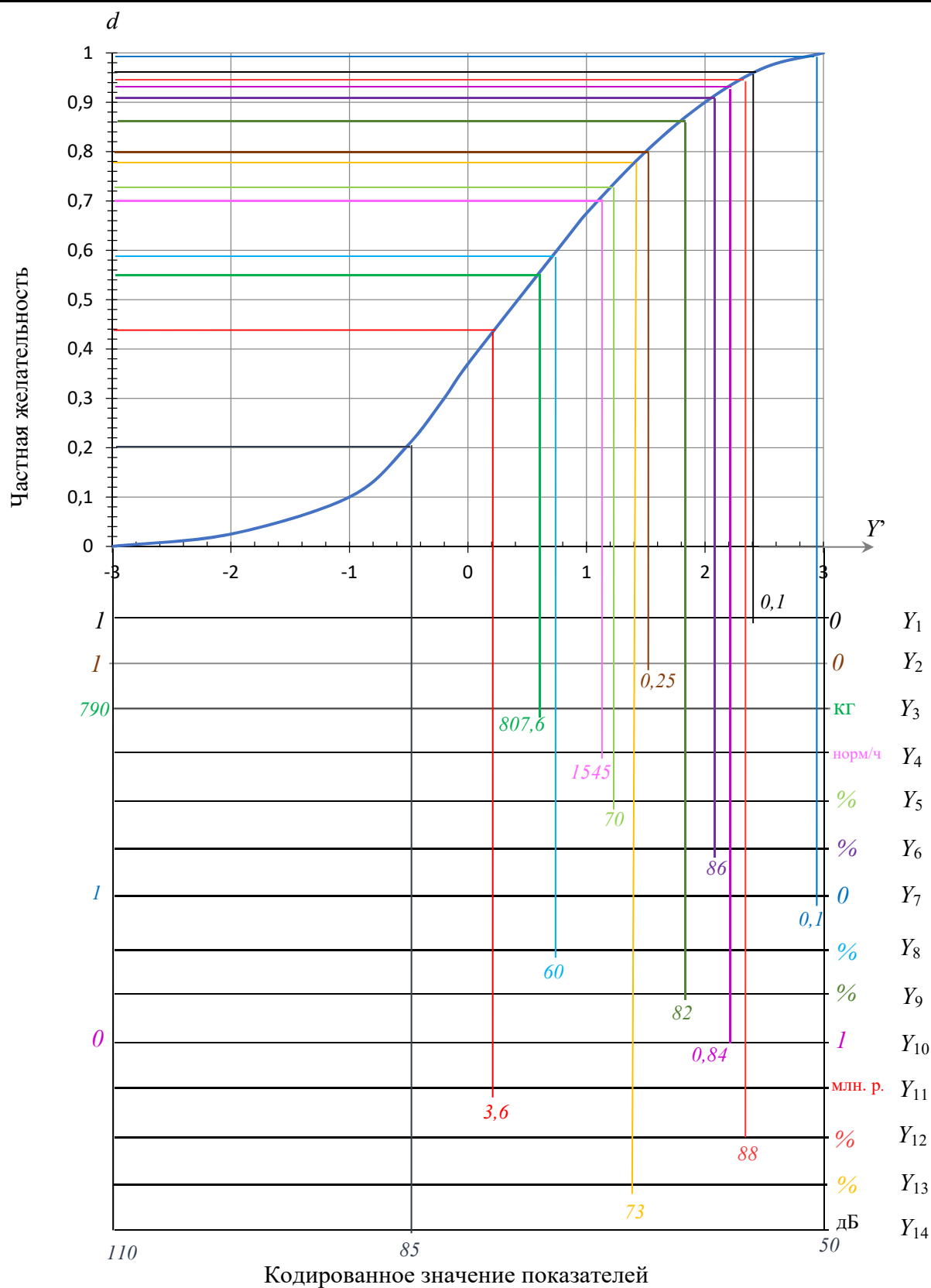


Рис. 1. Функция желательности

### Оценка качества технологического процесса

Практическая реализация разработанной методики оценки качества технологических процессов была апробирована на примере технологического процесса сборки узла «XXX». Выполненное преобразование натуральных значений частных откликов в частные функции желательности представлено в табл. 3.

Таблица 3

Натуральные и обобщённые по функции желательности отклики

Условное обозначение натуральных значений по показателям												
технологическим												
Y <sub>1</sub>			Y <sub>2</sub>			Y <sub>3</sub>			Y <sub>4</sub>			D <sub>1</sub>
y <sub>1</sub>	y <sub>1</sub> '	d <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>2</sub> '	d <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	y <sub>3</sub> '	d <sub>3</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>4</sub> '	d <sub>4</sub>	
0,1	2,4	0,96	0,25	1,5	0,8	807,6	0,6	0,55	1545	1,1	0,7	0,74
Условное обозначение натуральных значений по показателям												
назначения												
Y <sub>5</sub>						D <sub>2</sub>						
y <sub>5</sub>		y <sub>5</sub> '		d <sub>5</sub>								
70		1,2		0,73		0,73						
Условное обозначение натуральных значений по показателям												
надёжности												
Y <sub>6</sub>			Y <sub>7</sub>			Y <sub>8</sub>			Y <sub>9</sub>			D <sub>3</sub>
y <sub>6</sub>	y <sub>6</sub> '	d <sub>6</sub>	y <sub>7</sub>	y <sub>7</sub> '	d <sub>7</sub>	y <sub>8</sub>	y <sub>8</sub> '	d <sub>8</sub>	y <sub>9</sub>	y <sub>9</sub> '	d <sub>9</sub>	
86	2,07	0,91	0,1	2,9	0,99	60	0,66	0,59	82	1,8	0,86	0,81
Условное обозначение натуральных значений по показателям												
безопасности						экономическим						
Y <sub>10</sub>					D <sub>4</sub>	Y <sub>11</sub>					D <sub>5</sub>	
y <sub>10</sub>		y <sub>10</sub> '		d <sub>10</sub>		y <sub>11</sub>		y <sub>11</sub> '		d <sub>11</sub>		
0,84		2,2		0,93		0,93	3,6		0,2		0,42	
Условное обозначение натуральных значений по показателям												
стандартизации и унификации						эргономическим и эстетическим						
Y <sub>12</sub>			Y <sub>13</sub>			D <sub>6</sub>	Y <sub>14</sub>			D <sub>7</sub>		
y <sub>12</sub>	y <sub>12</sub> '	d <sub>12</sub>	y <sub>13</sub>	y <sub>13</sub> '	d <sub>13</sub>		y <sub>14</sub>	y <sub>14</sub> '	d <sub>14</sub>			
88	2,3	0,94	73	1,4	0,78	0,85	85	-0,5	0,2	0,2		

Коэффициенты весомости ( $\beta_u$ ) показателей свойств технологического процесса определяются экспертным опросом по методу рангов. Составляется ранжированный ряд свойств технологического процесса в порядке возрастания суммы рангов. Показатель значимости свойства соответствует месту  $u$ , которое свойство занимает в полученном ранжированном ряду:

$$\beta_u = \frac{u}{2^{u-1}}.$$

Значения коэффициентов весомости  $\beta_u$  для выбранных показателей качества технологических процессов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Показатель весомости свойств технологического процесса

Обозначение ранга свойства	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$\beta_6$	$\beta_7$
Значение показателя весомости	1,00	1,00	0,75	0,50	0,31	0,187	0,11

Комплексная оценка качества технологического процесса рассчитывается как обобщённая функция желательности ( $D$ ) и определяется в соответствии с разработанной последовательностью:

1. Перевод частных показателей свойств технологического процесса в кодированные значения ( $y$ ).
2. Определение частных функции желательности  $d_i$  по формуле (2).
3. Установление соответствия значений базовых точек величинам наблюдаемых параметров экспертным методом.
4. Установление линейной зависимости между рассматриваемыми показателями качества технологического процесса и их безразмерными значениями.
5. Определение частной функции желательности (по рис. 1).
6. Построение диаграммы значений комплексных показателей качества (см. рис. 2).

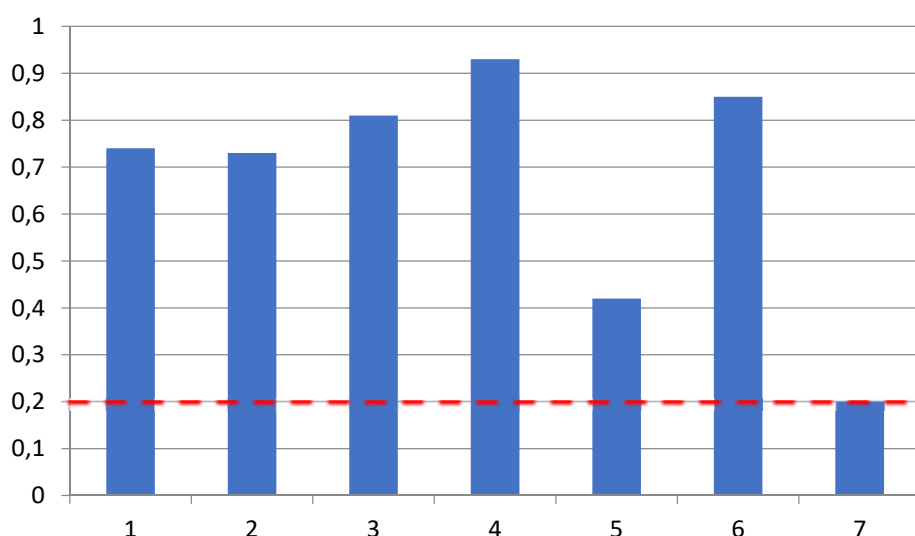


Рис. 2. Диаграмма значений комплексных показателей качества технологического процесса

7. Анализ полученных данных проводится на основании значений, представленных на диаграмме (см. рис. 2). Исходя из проведенного анализа наивысшие значения имеют показатели надёжности, безопасности, назначения, а также показатель стандартизации и унификации. Значения эргономических и эстетических показателей оказались самыми низкими и, следовательно, для этих показателей необходимо разработать мероприятия по их улучшению.

8. Расчёт обобщённой функции желательности  $D$  по формуле (1):

$$D = \sqrt[7]{D_1^{\beta_1} \cdot D_2^{\beta_2} \cdot D_3^{\beta_3} \cdot D_4^{\beta_4} \cdot D_5^{\beta_5} \cdot D_6^{\beta_6} \cdot D_7^{\beta_7}},$$

$$D = \sqrt[7]{0,74^1 \cdot 0,73^1 \cdot 0,81^{0,75} \cdot 0,93^{0,5} \cdot 0,42^{0,31} \cdot 0,85^{0,187} \cdot 0,2^{0,11}} =$$

$$= \sqrt[7]{0,74 \cdot 0,73 \cdot 0,85 \cdot 0,96 \cdot 0,76 \cdot 0,97 \cdot 0,84} = 0,83.$$

9. Обобщённая оценка технологического процесса сравнивается со шкалой стандартных оценок (см. табл. 2) и между собой.

10. После расчёта и анализа полученного значения обобщённой функции желательности  $D$  делается вывод об уровне качества рассматриваемого технологического процесса. Чем большее значение имеет обобщённая функция желательности, тем выше будет качество технологического процесса.

**Вывод.** Исследованный по разработанной методике технологический процесс соотносится по шкале желательности с уровнем «очень хорошо». Анализ результатов оценки показал, что технологический процесс сборки узла «XXX» пригоден для использования.

### Заключение

Разработанная методика оценки качества технологических процессов основывается на применении функции желательности, что позволяет производить сопоставление как измеряемых, так и оцениваемых откликов.

Предложенная методика позволяет проводить оценку качества существующих технологических процессов, а также разработать требования к новым технологическим процессам машиностроительных производств.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Методические основы количественного оценивания технологических процессов / Р. В. Буткевич, Ю. С. Клочков, Т. С. Яницкая, С. А. Ярыгин // Известия Самарского научного центра РАН. – 2005. – Т. 7. – № 2. – С. 456-463.
2. Михайловский, И. А. Управление качеством изделий на основе регламентации комплекса требований к процессам их производства / И. А. Михайловский // Век качества. – 2011. – № 2. – С. 49-51.
3. Федюкин, В. К. Управление качеством технологических процессов / В. К. Федюкин. – М.: КНОРУС, 2013. – 232 с.
4. Дербишев, А. В. Управление технологическими процессами в машиностроении и приборостроении / А. В. Дербишев. – М.: Издательство стандартов, 1977. – 164 с.
5. Кравченко, Е. Г. Разработка критериев оценки качества технологических процессов машиностроительных производств / Е. Г. Кравченко, Т. Ю. Забарина // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 46-й научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГТУ», 2016. – С. 205-207.
6. Кравченко, Е. Г. Методика оценки качества технологических процессов / Е. Г. Кравченко, Т. Ю. Забарина, А. А. Степанов // Современные материалы, техника и технологии. – 2016. – № 1 (4). – С. 118-121.
7. Отряскина, Т. А. Исследование термодинамических процессов при стружкообразовании / Т. А. Отряскина, Е. Г. Кравченко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 85-89.
8. Саблин, П. А. Высота микронеровностей и параметры шероховатости – комплексная оценка качества обработанной поверхности / П. А. Саблин, В. С. Щетинин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № VII-1 (47). – С. 90-94.
9. Космынин, А. В. Обеспечение качества обработки материалов резанием посредством внедрения трансформируемых управляемых звеньев в систему станочных систем / А. В. Космынин, В. С. Щетинин, П. А. Саблин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № V-1 (45). – С. 115-118.
10. Оценка точности контроля шероховатости поверхностей изделий машиностроения / Е. Г. Кравченко, В. В. Алтухова, А. С. Гамаюнова, Е. А. Середкина // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V (53). – С. 55-64.

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**  
**BUILDING AND ARCHITECTURE**

**Дзюба В. А., Погорельских И. В., Сайдамирова О. А.**  
**V. A. Dzyuba, I. V. Pogorelskikh, O. A. Saidamirova**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
С МУФТОВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ АРМАТУРЫ**

**RESEARCH OF ULTIMATE DEFORMATIONS OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS  
WITH VALVE COUPLING JOINTS REINFORCEMENT**

**Дзюба Виктор Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Viktor A. Dzyuba** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Construction and Architecture Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Погорельских Инга Витаутовна** – старший преподаватель кафедры «Строительство и архитектура» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Inga V. Pogorelskikh** – Senior Lecturer, Construction and Architecture Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Сайдамирова Ольга Александровна** – магистр направления «Строительство» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Olga A. Saidamirova** – Master's Degree Student Major in Construction, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** В работе рассмотрено поведение изгибаемых железобетонных элементов, имеющих в растянутой зоне арматуру с муфтовыми соединениями. На основе проведённых машинных экспериментов и обзора литературы установлена степень влияния податливости муфтового соединения на напряжённо-деформированное состояние железобетонных конструкций. При проведении машинных экспериментов использована нелинейная деформационная модель с полными диаграммами деформирования бетона и арматуры.

**Summary.** The paper considers the behavior of bend reinforced concrete elements having reinforcement with coupling joints in the stretched zone. Based on the conducted machine experiments and literature analysis, the degree of influence of the malleability of the coupling joint on the stress-strain state of reinforced concrete structures has been established. When conducting machine experiments, a nonlinear deformation model with complete diagrams of concrete and reinforcement deformation was used.

**Ключевые слова:** монолитные конструкции, диаграмма деформирования, арматурный стержень, муфтовые соединения, предельные деформации.

**Key words:** monolithic structures, deformation diagram, reinforcing bar, coupling joints, ultimate deformations.

УДК 691.87

Традиционные соединения арматуры при возведении монолитных зданий приводят к перерасходу стали. Стыки стержней на муфтах позволяют существенно снизить количество арматуры в сравнении со стыками внахлест при изготовлении монолитных конструкций, а также уменьшают продолжительность строительства [1; 2].

Для надёжного проектирования монолитных зданий, имеющих муфтовые соединения в арматурных каркасах, необходимы дополнительные исследования сопротивления арматуры с такими соединениями. Результаты, опубликованные в работе [3], позволили существенно расширить представления о поведении муфтовых соединений под нагрузкой. В статье приведены материалы испытаний стержней из арматурной стали класса А500, в том числе соединённых муфтами LENTON фирмы ERICO типа А12 диаметром 32 мм. Испытания на растяжение проводились на



универсальной машине ИК-1000.04. Экспериментальные данные представлены в табл. 1 и на рис. 1. Как следует из материалов эксперимента, стержни с муфтовыми соединениями обладают повышенной деформативностью. Авторы исследования предлагают снижать модуль упругости арматуры, имеющей муфтовые соединения, путём введения коэффициента  $\gamma_E$ . Значение коэффициента  $\gamma_E$  на основе обработки экспериментальных данных предложено авторами принимать равным 0,86, то есть

$$E_S = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}; \quad E_{SM} = E_S \cdot \gamma_E; \quad E_{SM} = 2 \cdot 10^5 \cdot 0,86 = 1,72 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

Таблица 1

Результаты испытаний (по данным работы [3])

Муфтовое соединение Ø32			
$\sigma$ , МПа	$\varepsilon \cdot 10^5$	$\sigma$ , МПа	$\varepsilon \cdot 10^5$
0	0	0	0
101	50,8	101	45,2
201	104,7	201	97,6
302	169,1	302	142,9
403	223,8	403	204,8
503	291,3	503	273,8
541	554,0	541	638,1
Муфта		Стержень	

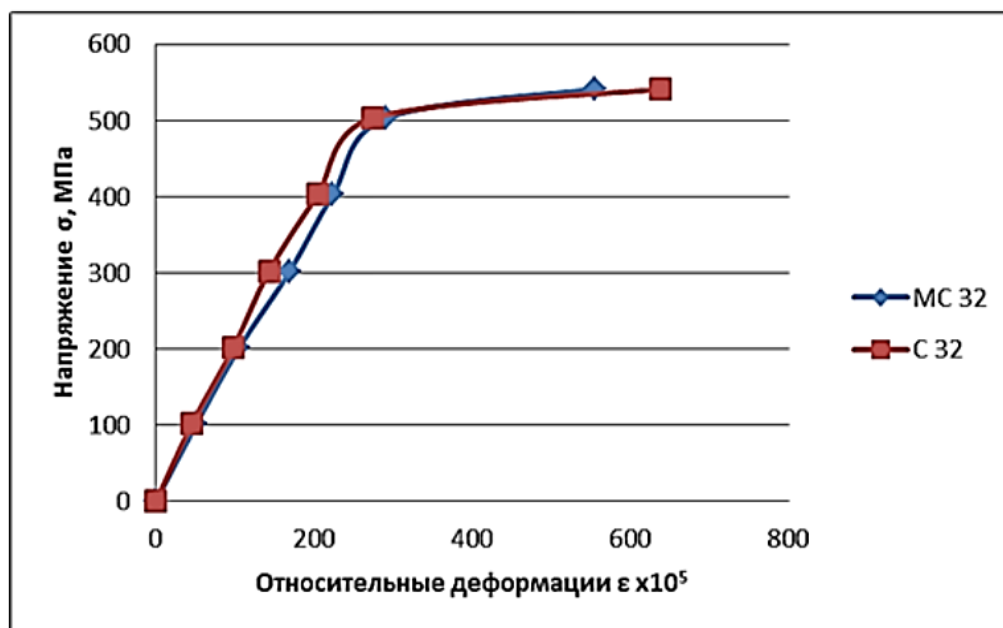


Рис. 1. Диаграмма деформирования муфтового соединения (по данным работы [3])

В Комсомольском-на-Амуре государственном университете в 2018-2019 годах были проведены исследования пластических свойств новой арматурной стали класса А500 [4]. Экспериментальная диаграмма растяжения арматуры класса А500 с постоянной скоростью деформирования представлена на рис. 2.

Использование диаграммы растяжения арматуры позволило оценить с помощью численного метода [5] поведение железобетонного элемента с таким армированием на всех стадиях нагружения, а также смоделировать в машинном эксперименте работу железобетонного элемента с муфтовым соединением арматуры с учётом данных [3].

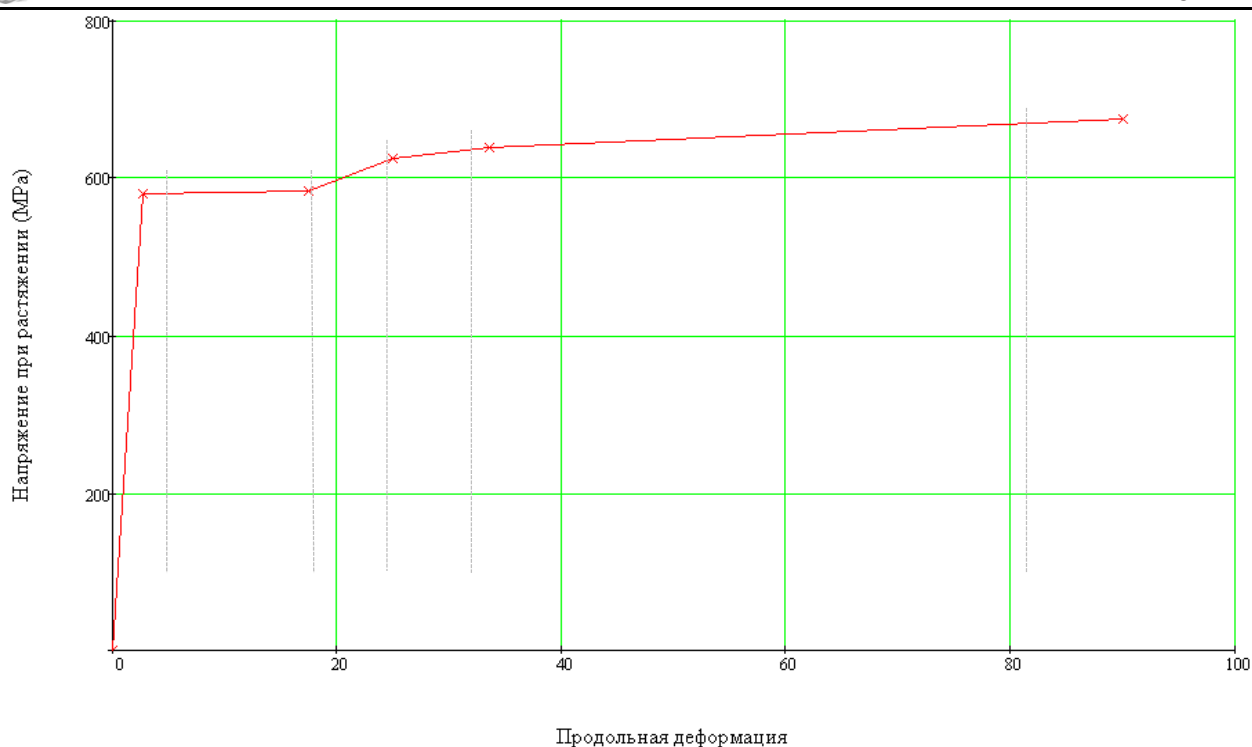


Рис. 2. Диаграмма растяжения арматурного стержня

Для проведения машинных экспериментов использована программа «GID», разработанная В. А. Дзюбой и Ю. С. Глушаковой [5]. В основу программы положена нелинейная деформационная модель, использующая полные диаграммы деформирования бетона и арматуры.

В данном эксперименте исследовались железобетонные балки сечением  $0,6 \times 0,2$  м; класс бетона – В20. Были проведены две группы машинных экспериментов. В первой группе армирование образцов осуществлялось арматурой класса А500С, а во второй – также арматурой класса А500С, но с муфтовым соединением. Диаграмма деформирования волокон бетона сжатой зоны принималось в виде составной функции с нисходящей ветвью [5].

Диаграмма растяжения арматуры была представлена кусочно-линейной функцией, полученной по результатам испытания арматуры на растяжение. Деформация арматуры в начале площадки текучести принималась равной  $\varepsilon_1 = 2,7 \cdot 10^{-3}$  [42]. Для арматуры с муфтовыми соединениями с учётом повышенной податливости стыков это значение составляло  $\varepsilon_{1M} = \varepsilon_1 / 0,86 = 3,14 \cdot 10^{-3}$ . Ввод исходных данных производился в определённом формате (см. рис. 3).

**ГИД**

Управление

Расчётная часть: Параметры арматуры | Диаграмма деформирования бетона | Диаграмма "Момент - кривизна"

Призматическая прочность бетона ( $R_b$ , МПа):

Начальный модуль упругости:

Высота балки ( $h$ , м):

Ширина балки ( $b$ , м):

Число рассчитываемых деформаций:

Площадь сечения арматуры ( $A_s$ , м<sup>2</sup>):

Высота защитного слоя ( $a$ , м):

Максимальная деформация крайнего волокна бетона ( $\varepsilon_{bf}$ ):

Применить

Деформация крайнего волокна ( $\varepsilon_{bf} \cdot 0.001$ )	Деформация в арматуре ( $\varepsilon_s \cdot 0.001$ )	Деформация в растянутом бетоне	Высота сжатой зоны бетонного волокна ( $\xi$ , м)	$N_b$ (кН)	$N_s$ (кН)	$N_{bt}$ (кН)	Момент в сжатом бетоне ( $M_b$ , Н·м)	Момент в растянутой арматуре ( $M_s$ , Н·м)	Момент в растянутом бетоне ( $M_{bt}$ , Н·м)	Сумма моментов ( $M$ , Н·м)	Напряжение сжатого бетона	Напряжение в растянутом бетоне	Напряжение в арматуре ( $\sigma$ , МПа)

Рис. 3. Ввод исходных данных

В каждой группе машинных экспериментов варьировалась высота сжатой зоны  $\xi$ , т.к. значение относительной высоты сжатой зоны определяет способность изгибаемого элемента к пластическому или хрупкому деформированию. В итоге было проведено шесть машинных экспериментов. Значения относительной высоты сжатой зоны в расчётах были равны:

1.  $\xi = 0,1$  – слабоармированные конструкции;
2.  $\xi = 0,25$  – среднеармированные конструкции;
3.  $\xi = 0,5$  – граничные значения армирования.

С помощью программы «GID» был произведён расчёт шести железобетонных балок с арматурой без муфт и с муфтовыми соединениями. Для каждого образца определены параметры напряжённо-деформированного состояния на всех этапах нагружения вплоть до полного разрушения конструкции. Внутренний изгибающий момент сечения вычислялся как сумма моментов, создаваемых волокнами сжатого и растянутого бетона, а также растянутой арматуры. Кривизна на каждом этапе расчёта принималась по выражению

$$K = \frac{\varepsilon_b + \varepsilon_s}{h_0},$$

где  $\varepsilon_b$  – деформация крайнего сжатого волокна;  $\varepsilon_s$  – деформация растянутой арматуры;  $h_0$  – рабочая высота сечения.

По результатам расчётов были построены графики «момент – кривизна» для железобетонных балок, армированных сталью класса А500С и для железобетонных балок, армированных сталью класса А500С с муфтовым соединением (см. рис. 4).

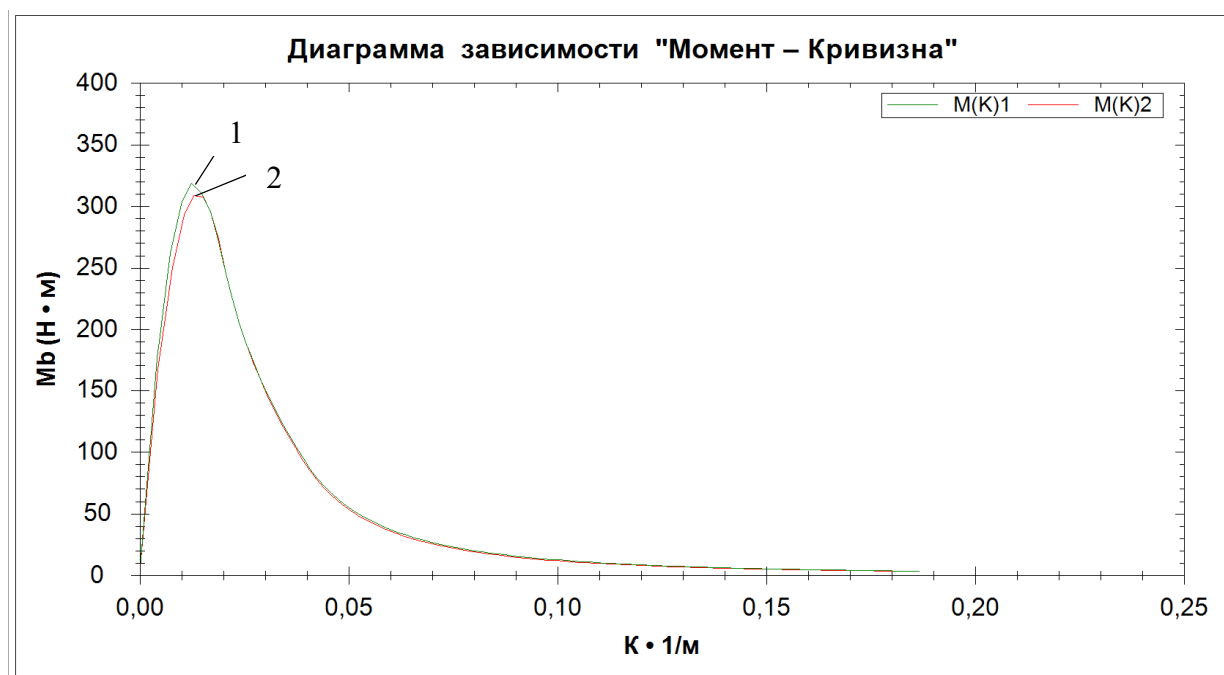


Рис. 4. Диаграмма зависимости «момент-кривизна»:  
1 – для образца с арматурой А500 при  $\xi = 0,5$  (M(K)1);  
2 – с арматурой А500 с муфтовым соединением при  $\xi = 0,5$  (M(K)2)

Сравнение результатов расчётов железобетонных элементов с арматурой с муфтовыми соединениями и без соединений показывает, что пониженный модуль упругости муфтового соединения не вызывает существенного изменения в напряжённо-деформированном состоянии железобетонного элемента.



В конструкциях, обладающих высокой пластичностью (при относительной высоте сжатой зоны равной 0,1 и 0,25), графики деформирования «момент-кривизна» для элементов с муфтами и без таковых не отличаются. Изменения происходят для хрупких железобетонных элементов (при относительной высоте сжатой зоны 0,5). В этом случае снижается значение максимального изгибающего момента для конструкций с муфтовыми соединениями арматуры (3-5 %), однако увеличивается пластичность деформирования конструкции при максимальном моменте (появляется незначительная площадка текучести на диаграмме «момент-кривизна», которая отсутствует в конструкциях с обычной арматурой).

Данное обстоятельство можно рассматривать как благоприятный фактор при расчёте статически неопределимых систем с высоким содержанием арматуры, позволяющий улучшить перераспределение усилий в несущей системе многоэтажного здания.

Таким образом, железобетонные элементы, имеющие арматуру с муфтовыми соединениями, обладают высокой надёжностью. Муфтовые арматурные соединения не меняют напряжённо-деформированное состояние элементов, работающих в режиме  $\xi \leq \xi_R$ , т.е. в случае, когда относительная высота сжатой зоны не превышает граничного значения, а при  $\xi = \xi_R$  обладают более высокой пластичностью по сравнению с обычно армированными конструкциями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование свободных и вынужденных колебаний разомкнутых тонкостенных железобетонных оболочек / Е. О. Сысоев, К. К. Кахоров, О. Е. Сысоев, Е. В. Журавлева // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2020. – № 1 (43). – С. 13-23.
2. Сысоев, О. Е. Исследование собственных колебаний и напряжённо-деформированного состояния замкнутого кольца при местном нагреве / О. Е. Сысоев, А. Ю. Добрышкин, С. Н. Нейн // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2018. – № I-1 (33). – С. 34-38.
3. Чепизубов, И. Г. Сравнительный анализ работы муфтовых соединений арматуры и сварных стыков с использованием ванн / И. Г. Чепизубов, Г. А. Моисеенко, В. М. Степанов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2019. – № 4 (382). – С. 206-210.
4. Дзюба, В. А. Исследования пластических свойств арматурных сталей / В. А. Дзюба, Е. В. Журавлева // Региональные аспекты развития науки и образования в области архитектуры, строительства, землеустройства и кадастров в начале III тысячелетия: материалы Международной научно-практической конференции. Комсомольск-на-Амуре, 16-18 декабря 2019 г. / редкол.: О. Е. Сысоев (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2020. – С. 143-145.
5. Дзюба, В. А. Применение составной функции диаграммы сжатого бетона для деформационной оценки конструкций / В. А. Дзюба, Ю. С. Глушакова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2014. – № II-1 (18). – С. 109-114.

Гринкруг Н. В., Меньшикова В. А.  
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЛАНДШАФТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ИХ ВЛИЯНИЕ  
НА АРХИТЕКТУРУ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ И СТРОИТЕЛЬСТВО

Гринкруг Н. В., Меньшикова В. А.  
N. V. Grinkrug, V. A. Menshikova

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЛАНДШАФТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ИХ ВЛИЯНИЕ НА АРХИТЕКТУРУ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ И СТРОИТЕЛЬСТВО

### MODERN METHODS OF LANDSCAPE DESIGN, THEIR IMPACT ON THE ARCHITECTURE OF THE URBAN ENVIRONMENT AND CONSTRUCTION

**Гринкруг Наталья Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Дизайн архитектурной среды» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. +7(4217)53-10-23. E-mail: das@knastu.ru.

**Natalya V. Grinkrug** – PhD in Engineering, Associate Professor, Design of the Architectural Environment Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Russia, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin str., 27; tel. +7(4217)53-10-23. E-mail: das@knastu.ru.

**Меньшикова Валентина Александровна** – студент 5-го курса кафедры «Дизайн архитектурной среды» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: valentina.menshikova.1998@mail.ru.

**Valentina A. Menshikova** – 5th-year Student, Design of the Architectural Environment Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Russia, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin str., 27. E-mail: valentina.menshikova.1998@mail.ru.

**Аннотация.** В статье рассмотрено влияние ландшафта и его проектирования на формирование архитектуры и организацию строительства с учётом особенностей существующего ландшафта. Проведён анализ используемых конструкций для оптимизации методики архитектурного проектирования на рельефе в строительстве. Выявлены основные аспекты особенностей проектирования и применение инженерных технологий ландшафтного дизайна.

**Summary.** The article considers the influence of the landscape and its design on the formation of architecture and the organization of construction, taking into account the features of the existing landscape. The analysis of the structures used to optimize the methodology of architectural design on the relief in construction is carried out. The main aspects of the design features of load-bearing structures of structures are identified.

**Ключевые слова:** ландшафт, строительство, архитектура, ландшафтное проектирование.

**Key words:** landscape, construction, architecture, landscape design.

УДК 721

Ландшафтная архитектура – это среда открытых пространств, которая включает в себя специфические материалы, такие как рельеф, водные ресурсы, различные малые архитектурные формы, озеленение. Так, ландшафтная архитектура преобразует городское пространство средствами природных и искусственных форм.

Цель архитектурного проектирования и планирования – организация открытых пространств таким образом, чтобы были завязаны три фактора проектирования (экологический, функциональный и эстетический), а также сформулированы принципы архитектурно-планировочной организации для создания комфортной городской среды.

В настоящее время задачей ландшафтной архитектуры является использование актуальных, новых форм рельефа, различного озеленения, функциональных элементов городской среды.

Ландшафтная архитектура имеет ряд основных методик проектирования, которые позволяют сформировать гармоничное архитектурное пространство:



1. ландшафтная архитектура располагает живыми материалами, способными динамично колебаться во времени и пространстве;
2. ландшафт может восприниматься различно в зависимости от природно-временного воздействия, такого как движение ветра, колористическое восприятие, освещение и т.д.;
3. пространственная композиция и есть основа ландшафта;
4. ландшафтная архитектура имеет непосредственное влияние на когнитивные чувства горожанина [1].

В результате ландшафтная архитектура – это материальная культура архитектурного пространства, которая обладает характерными особенностями. Она росла и формировалась, как и все остальные материальные и художественные культуры, в каждый этап развития обладала своей спецификой и приспособлялась к тем условиям, в которых образовывалась. Так появились два стилевых направления – регулярное и пейзажное. Регулярному стилевому направлению свойственны чёткие геометрические формы, обработанный рельеф, рядовые высадки растений, чёткие края водных пространств. Пейзажное стилевое направление обладает естественным рельефом, свободным краем водных пространств, извилистыми пешеходными путями и т.д. [2].

Современные тенденции в архитектуре и строительстве всё чаще стремятся к сохранению естественного рельефа проектируемого участка, что способствует появлению и становлению инновационных технологий [3]. Это ощущается в городской среде, зачастую проектирование ландшафта на открытой местности с уникальным природным рельефом подвергалось скучным и однообразным формам, либо производилась планация.

В такой ситуации необходимо понимать, что такое природный ландшафт. Природный ландшафт – это обширные открытые пространства, сохранившие свой первозданный вид и состоящие из пяти основных компонентов: климат, земля, растительность, животный мир, вода. При проектировании ландшафтного дизайна необходимо учесть каждый из этих компонентов. В современном городском пространстве можно говорить о частичном сохранении природного ландшафта из-за обширного процесса урбанизации, а также временных изменений, вызванных промышленным и сельскохозяйственным развитием [4]. Человечество на протяжении многих веков сознательно меняло природный ландшафт, тем самым формировался культурный ландшафт, который отличается комфортностью и функциональностью для жизнедеятельности человека в среде.

Практический опыт и тенденции развития архитектурного ландшафта сформировали несколько направлений:

- естественная среда как прогулочная зона с местами для отдыха – это различные садово-парковые рекреационные зоны, парки, спортивно-оздоровительные комплексы, выставочные сады, ботанические сады и т.д.;
- зоны озеленения со специальным назначением – это, в свою очередь, скверы, площади, прилегающие к жилым массивам озеленённые территории, городские ландшафтные комплексы, набережные, бульвары и т.д.;
- садовые формы на искусственных опорах, по большей части располагаемые на крышах домов;
- восстановление рельефа или рекультивация повреждённой ландшафтной среды;
- реставрация, реконструкция элементов ландшафтного пространства;
- организация коммуникационных связей в городском пространстве или в природе – это мосты, виадуки, дороги, линии электропередач [1].

За последние 100 лет городская среда значительно усовершенствовалась, что повлияло на появление новых направлений, форм и структур ландшафтного искусства в городской среде. Всё чаще используется связь паркового пространства с городской застройкой, появляются и развиваются новые парки, такие как многофункциональные, специальные, мини-парки. Технический прорыв способствовал появлению крытых садов и садов на крыше домов. Рекультивация паркостроения внесла свои коррективы в формирование современных городов. Началось активное использование геопластики и ленд-арта (см. рис. 1). Максимальное сохранение естественного ландшафтного облика поверхностей или искусственно созданные объёмы. Появление новых способов и форм

ландшафтного проектирования, а также создание комфортной городской среды с возможностью решить транспортные задачи [5].



Рис. 1. Действующий промышленный корпус, переоборудованный новый Детский комьюнити-центр. 2021 г. The Playscape, Пекин. Китай

Набирающая обороты глобализация внедряется и влияет на архитектурный ландшафт, на все сферы строительства. Так, появилась отличительная черта современного ландшафтного проектирования – интеграция различных стилей и направлений, их смешение, внедрение приёмов оформления, использование различных материалов. Кроме того, важно отметить, что сменяются подходы в организации пространства, заимствованные в других культурах, не свойственных той или иной стране. В то же время такой процесс не несёт негативного влияния и не создаёт однообразные открытые пространства, а, наоборот, формирует новую комфортную неповторимую среду. Таким образом сохраняется и наполняется культура разных стран мира.

Основные объекты проектирования ландшафтной архитектуры – это охраняемые ландшафты, городские парки, загородные пространства для отдыха.

Существуют различные критерии оценки проектирования ландшафта на сложном рельефе:

- визуальная целостность застройки с прилегающим ландшафтом в контексте естественной среды;

- форма рельефа не должна быть подчинена архитектурным объёмам;
- ландшафтный объём должен стилистически вписываться в окружающую среду;
- природная особенность территории подчёркивается внедряемыми элементами;
- наличие многофункциональных объектов на рельефе;
- просматриваемость [6].

На примере проекта «рекреационный центр “Остров Баран” в Екатеринбурге» рассмотрим, как могут объединяться природные формы и архитектура в единый полноценный комплекс (см. рис. 2). Организация и преобразование целого острова в нечто единое и неповторимое, представленное комплексом рекреационных энергосберегающих всесезонных арт-объектов. Этот проект отражает сопричастность природе, а также бережное отношение к миру природы, что позволяет двигаться в направлении современных тенденций в архитектуре.

Комплекс острова состоит из гостиницы, галереи со спа-комплексом и общественного блока, каждый из которых выполняет свои функции. Здание гостиницы естественным образом сливается с рельефом, так как в архитектуре данного пространства используются эксплуатируемые как смотровые площадки кровли, что подчёркивает это взаимодействие. Максимально доступные технологии позволяют встроить здание в окружающую среду с помощью отделки фасадов из зеркального стекла с частями грубого текстурированного камня. Одна из особенностей – это то, что остров обеспечивается автономными энергетическими ресурсами круглый год, генераторы пере-

рабатывают энергию, полученную от волн воды, перемещения людей и ветра. В этом и заключается главная идея проекта острова «Баран» [7].

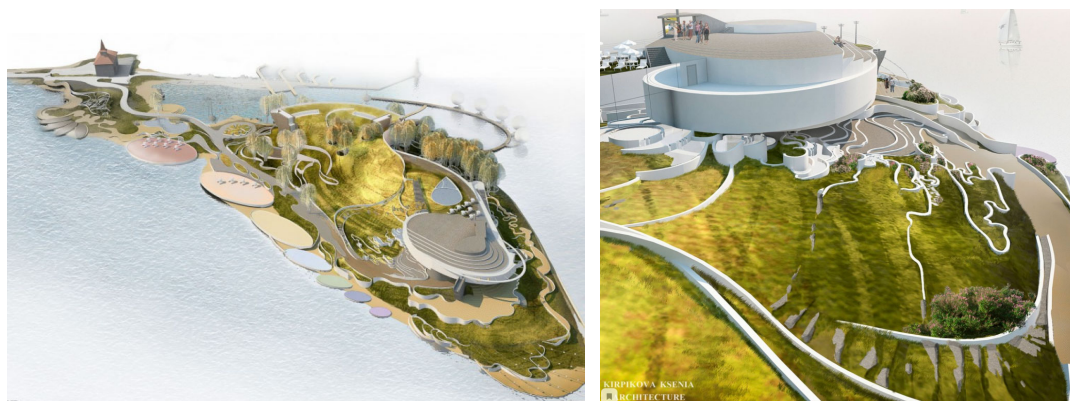


Рис. 2. Проект «рекреационный центр “Остров Баран” в Екатеринбурге». 2015 г.

Важной составляющей уникального проекта ландшафтной архитектуры остаётся его инженерное обеспечение. Необходимо на стадии проектирования учесть факторы, влияющие на инженерную составляющую проекта, т. к. есть огромный риск создания аварийных и неработоспособных элементов ландшафта. Поэтому проводятся инженерно-геологические и геодезические изыскания. Характеристика и исследование пород, включённых в структуру территории проектирования, являются главными целями инженерно-геологических изысканий. Геологические исследования благоустраиваемой территории создают благоприятные условия для организации городского пространства. Показатели проведённых изысканий дают основание для тех или иных конструкций ландшафтной архитектуры, проведения дренажной системы, вертикального озеленения или использования специфических материалов [8].

Существуют три составляющие, которые можно отметить при ландшафтном проектировании: состав пород участка, уровень и характер грунтовых вод, а также их химический состав. Такие составляющие влияют на выбор конструктивного решения элементов ландшафта, т.е. различных фундаментов ограды, подпорных стенок, лестниц, оснований малых архитектурных форм и т.д.

В свою очередь, геодезические изыскания предназначены для наиболее подлинного отображения действующей инфраструктуры проектируемого участка, а также подземных коммуникаций, рельефа. Проектируемая территория включает в себя материальные объекты (здания и сооружения), элементы благоустройства (фонари, визуальные коммуникации, урны и т. п.), озеленение (деревья и кустарники), способы передвижения (пешеходные пути, аллеи, скверы и т. п.).

Поэтому геоподоснова играет решающую роль в проектировании. К примеру, проектируемый участок, имеющий плоскую поверхность, имеет ряд характеристик, которые приведут к негативным результатам при его эксплуатации. Возможны такие проявления, как микрозаземления, вследствие чего возникнет переувлажнение участка; возможно также, что идея архитектора просто не воплотится в жизнь, так как были нарушены пропорции и существующая ситуация далека от ситуации, изображённой на проекте архитектора; дискомфорт при эксплуатации никто не отменял, движение по пешеходным путям, возможно, будет затруднено из-за сильных перепадов высот и т. д. Системы координат на участке – один из самых важных пунктов ландшафтного проектирования. Правильное определение направления севера и высоты над уровнем моря позволяет уточнить исходные высотные точки объектов инфраструктуры участка. Материалы геодезических изысканий для ландшафтного проектирования по своему составу значительно отличаются от тех, которые используются для гражданского строительства, т. к. обладают рядом особенностей:

- **Масштаб.** Необходимый масштаб для проектирования – М 1:100, 1:200.

- **Инфраструктура** должна отражать точные детали проектируемого участка, подразумевает использование топографического плана.



- **Отображение растительности.** Исследование подразумевает отметку пород деревьев, а также их геометрические размеры.

- **Рельеф.** Исследование рельефа должно проводиться с максимальной точностью. Такой подход позволит реализовать даже самые смелые концептуальные идеи архитектора. Особое внимание уделяется к ровным участкам, т. к. перед проектировщиками стоят задачи по водоотведению и сокращению проводимых работ по вертикальной планировке территории. Для этого проводится изучение участка с указанием и отображением рельефа местности с перепадом 0,1 м.

Необходимо отметить различие между надземной съёмкой и съёмкой подземных коммуникаций.

При подземной съёмке возникает ряд сложностей, например, положение проложенных под землёй коммуникаций. Специалисты используют предназначенное для этого оборудование. Их местоположение измеряется при помощи звуковых колебаний. Ограниченные возможности такого приёма заключаются в том, что звуковые сигналы имеют ограничения в дальности. Возникают ситуации, при которых коммуникационные колодцы затоплены либо не доступны для измерений.

Инженерная подготовка участка – это работа по искусственному изменению действующего рельефа.

Для территорий, расположенных на покатых склонах, проводятся исследования и специальные мероприятия по осушению местности. Устраивают дренажные системы и ливневые канализации. Эти системы должны учитывать решения проектируемого генерального плана, т. е. его инфраструктуру и вертикальную планировку этого участка. На равнинных территориях также необходимо организовать систему водоотведения ливневых и талых вод – задать оптимальные уклоны для предотвращения переувлажнения растительности на участке.

Ландшафтная работа, представленная в проектировании детской площадки, позволяет развивать фантазию ребёнка, улучшая навыки и умения. Искусственно возведённый ландшафт выполнен из битумной смеси, торфа и алюминиевой краски (см. рис. 3).



Рис. 3. Скульптурный пейзаж для игр в Швейцарии. 2017 г.

Идея такого ландшафта позволяет детям почувствовать себя больше относительно масштаба местности – это можно назвать «топографической игрой» (см. рис. 3) [9].

В процесс дизайн-проекта необходимо включить этап минимизации эксплуатационных рисков и этап анализа. Проведя глубокий анализ территории для ландшафтного проекта, можно получить качественный результат, который обеспечит долговечность эксплуатации проектируемого участка в том виде, в котором его представил архитектор, и минимизирует эксплуатационные риски и затраты. Также необходимо, чтобы работы на участке были выполнены строго по проекту.

Жители города также заинтересованы в реализации ландшафтных проектов в парковой, городской среде и придомовой территории в жилых районах, т. к. растёт осознанность негативных последствий промышленных факторов в городском пространстве.



Таким образом, можно отметить, что существует огромное количество неограниченных возможностей для проектирования архитектурного ландшафта: возможности организации экологичного подхода в творчестве и утверждение актуальной эстетической и функциональной городской среды, необъятные возможности природных элементов. Накопленный опыт в отечественной и зарубежной современной архитектуре даёт огромный информационный пласт, что способствует широким исследовательским работам в сфере архитектурного ландшафта. Приёмы ландшафтного проектирования расширяются и постепенно наполняют закрытые пространства, тем самым становясь формообразующими элементами архитектуры. Таким образом, комплексное благоустройство при учёте уникальности рельефа способно решить архитектурные и ландшафтные проблемы городского пространства, а также создать точки притяжения жителей города для объединений и создания нового направления развития городов [10]. Наряду со всем этим востребованность методик ландшафтного проектирования в формировании городской среды возрастает благодаря постоянной трансформации городов и их росту, коммуникации различных групп населения, смене и смешению архитектурных стилей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кайдалова, Е. В. Ландшафтная архитектура: конспект лекций [Электронный ресурс] / Е. В. Кайдалова. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2019. – 165 с. – Режим доступа: [https://bibl.nngasu.ru/electronicresources/uchmetod/landscape\\_arch/872584.pdf](https://bibl.nngasu.ru/electronicresources/uchmetod/landscape_arch/872584.pdf) (дата обращения: 11.04.2021).
2. Ландшафтная архитектура и зелёное строительство [Электронный ресурс] / Информационно-образовательный портал Totalarch. – Режим доступа: <http://landscape.totalarch.com/> (дата обращения: 11.04.2021).
3. Суворов, В. О. Типология жилья в условиях сложного рельефа по архитектурно-пространственной компоновке относительно склона / В. О. Суворов // Фундаментальные и прикладные проблемы науки: материалы VIII Междунар. симпозиума (10-12 сентября 2013 г., Непряхино, Челябинской обл.). – М.: РАН, 2013. – Т. 7. – С. 11-16.
4. Архитектура и проектирование ландшафтов [Электронный ресурс] / Межрегиональная ассоциация архитекторов и проектировщиков, 2008-2021. – Режим доступа: <https://www.npmaap.ru/useful/lsi/arhilan.html> (дата обращения: 11.04.2021).
5. Харьков, В. А. К вопросу о понятии рационального использования земель / В. А. Харьков // Известия Тульского государственного университета. Экономические и юридические науки. – 2008. – Вып. 1. – С. 266-271.
6. Шурыгина, Ю. В. Особенности архитектурно-планировочной организации жилой застройки в условиях сложного рельефа / Ю. В. Шурыгина // Строительство и техногенная безопасность. – 2017. – № 6 (58). – С. 35-38.
7. Рекреационный центр «Остров Баран» в Екатеринбурге [Электронный ресурс] / Архитектурное бюро Ксении Кирпиковой. – Режим доступа: <http://kirpikova.ru/portfolio/rekreacionnyj-centr-ostrov-baran/11/> (дата обращения: 11.04.2021).
8. Тюменцев, И. В. Инженерное обеспечение ландшафтного проектирования [Электронный ресурс] / И. В. Тюменцев / Школа ландшафтного дизайна. – Режим доступа: <https://landscape-school.ru/stati/124-2010-03-25-12-15-57.html> (дата обращения: 11.04.2021).
9. Варламов, И. А. Лучшие в мире общественные пространства 2017 года [Электронный ресурс] / И. А. Варламов / Блог Teletype. – Режим доступа: <https://varlamov.ru/2730676.html> (дата обращения: 04.11.2021).
10. Галкина, Е. Г. Проблемы в организации общественных пространств современного города и варианты их решения в студенческих проектах (на примере города Комсомольска-на-Амуре) / Е. Г. Галкина, Н. В. Грин-круг // Современные наукоёмкие технологии. – 2019. – № 3-2. – С. 140-145.



Сохацкая Д. Г., Зубкова К. С.  
D. G. Sokhatskaya, K. S. Zubkova

## ЭКОЛОГИЯ КАК ОДИН ИЗ КРИТЕРИЕВ КОМФОРТНОСТИ ЖИЛОГО КВАРТАЛА

## ECOLOGY AS ONE OF THE COMFORT CRITERIA OF THE RESIDENTIAL QUARTER

**Сохацкая Дарья Геннадьевна** – доцент кафедры «Дизайн архитектурной среды» Комсомольского-на-Амуре государственного университета, Член Союза дизайнеров России (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(962)288-02-68. E-mail: amurliman-design@yandex.ru.

**Daria G. Sokhatskaya** – Associate Professor, Design of Architectural Environment Department, Komsomolsk-na-Amure State University, Member of the Russian Union of Designers (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(962)288-02-68. E-mail: amurliman-design@yandex.ru.

**Зубкова Ксения Сергеевна** – магистр Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ksenia.k150897@gmail.com.

**Ksenia S. Zubkova** – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ksenia.k150897@gmail.com.

**Аннотация.** В статье рассматриваются основные аспекты экологии, влияющие на комфортность жилого квартала. Раскрыты новые смыслы понятия «экология». Рассмотрено понятие «урбоэкология», цели и задачи дисциплины. Затронуты вопросы, касающиеся экологических основ данной дисциплины, раскрыты различные аспекты понятия «гигиена городской среды». Обращено внимание на научное понятие «видеоэкология» как эстетический показатель пространства города. Представлено понятие автоматии саккад, которое раскрывает способы восприятия человеком окружающей среды. Наряду с этим городская среда может быть воспринята человеком как однородная и иметь огромное влияние на сознание индивида. Отмечены свойства среды, среди которых можно выделить агрессивные видимые поля.

**Summary.** The article discusses the main aspects of ecology that affect the comfort of a residential area. New meanings of the concept «ecology» are revealed. The concepts of «urban ecology», goals and objectives of the course are considered. The questions concerning the ecological foundations of this course are touched upon, various aspects of the concept of the hygiene of the urban environment are revealed. Attention is drawn to the scientific concept of video ecology as an esthetical indicator of the city's space. The concept of saccades automation is presented, which reveals the ways of human perception of the environment. Along with this, the urban environment can be perceived by a person as homogeneous, and has a huge impact on the consciousness of the individual. The properties of the environment are noted, among which aggressive visible fields can be distinguished.

**Ключевые слова:** экология, урбоэкология, визуальная экология, эстетика, видеоэкология, проектирование, микрорайон, жилой квартал, гигиена, комфорт, безопасность.

**Key words:** ecology, urban ecology, visual ecology, aesthetics, video ecology, design, microdistrict, residential area, hygiene, comfort, safety.

УДК 72

Большую часть жизни люди проводят в жилых кварталах, поэтому при проектировании и строительстве необходимо учесть все критерии для обеспечения комфортного проживания: инфраструктуру, безбарьерную среду, комфортную пешеходную и транспортную обстановку, пространство, способствующее добрососедству, а также экологию. Экология пространства имеет непосредственное влияние на все направления жизни человека: состояние эмоционального здоровья, развитие духовного потенциала, дальнейший культурный рост. Поэтому необходимо создать такое городское пространство, которое гармонично воспринималось бы людьми и оказывало на них позитивное влияние [1].



Для организации рационального, открытого для людей городского пространства используются различные подходы со стороны архитектуры, градостроительства и дизайна. На сегодняшний день архитектурное пространство следует рассматривать в призме экологии и экологических принципов [6]. Термин «экология» имеет не только биологическое значение, с течением времени это понятие приобрело ряд других смыслов:

- социально-политический, поскольку отношение человека к природе зависит от большого количества критериев, которые формируются исходя из социального статуса, индивидуальных потребностей, мировоззрения, окружающей среды, политических установок общества и др. Не зря бытует фраза: «Чисто не там, где убирают, а там, где не мусорят». Таким образом, в подавляющем большинстве случаев в кварталах проектной группы «ПИК» или, например, «Брусника», чьи кварталы рассчитаны на определённую целевую аудиторию, будет чище, чем на территории типовых советских панелек, где люди привыкли к «серой» действительности и имеют свой локально сложившийся менталитет;

- экономический – учитывается наносимый ущерб и положительное влияние при использовании природных ресурсов;

- географический, т. к. при строительстве и проектировании необходимо предусмотреть воздействие таких факторов, как климат (воздействие температур, влияние силы ветра и его направления на перемещение пыли и мусора), рельеф (влияние холмистой местности или, напротив, ровной на перемещение дождевых и грязевых потоков), почва (её устойчивость к механическому воздействию) и т.д.;

- педагогический – то, как подаётся информация о сохранении природы и правильном с ней обращении подрастающим поколениям;

- гигиенический – установка санитарно-гигиенических норм и правил, которые помогают исключить пагубное влияние на здоровье и безопасность человека;

- технический – всевозможное инженерное обеспечение для оптимизации и упрощения обращения с природными ресурсами и отходами.

При проектировании жилого квартала вышеизложенные значения дают возможность раскрыть потенциал территории и увидеть её функциональные особенности. Рассмотрим исследовательские направления экологии для более полного анализа проектных возможностей территории жилых кварталов [2].

Одной из сторон экологии, влияние которой в наибольшей степени сказывается на комфортности жилого квартала, является урбоэкология и её составляющие.

Урбоэкология – это взаимосвязь нескольких наук: архитектурных и градостроительных, географических, биологических, экономических и социальных. Исследования этих наук затрагивают различные аспекты деятельности людей с окружающей средой, которая находится внутри города. Урбоэкология затрагивает в том числе и отдельные части городской среды: микрорайоны и кварталы [6].

Экологические научные основы для урбоэкологии имеют первостепенное значение, однако используются лишь те, которые необходимо учитывать при рассмотрении особенностей взаимодействия урбанизированной и природной среды.

Цель урбоэкологии – поиск путей и решений в области архитектуры и градостроительства, формирования территории, направленных:

- на повышение качества жизни человека за счёт охраны окружающей среды;
- рациональное использование окружающей среды и природных зон;
- развитие социально-экономических процессов за счёт современных экологических подходов и принципов.

Если обратить внимание на ключевой фокус цели урбоэкологии, первое, что стоит отметить: уже на этапе выбора места для расположения будущего жилого квартала необходимо предусматривать аспекты, которые впоследствии могут влиять на загрязнённость местности – географические, в частности, ландшафт, поскольку каждому типу ландшафта характерны свои факторы. Ландшафты с ярко выраженной рельефностью, например, отличаются проявлением перемещения

сверху вниз различной пыли, а также грязевых и водных потоков, более равнинные территории – ветровым переносом мусора, песка, пыли.

Урбоэкология также рассматривает устойчивость ландшафта к антропогенным нагрузкам и исследует динамику его состояния. К примеру, травяной покров изменяется и ухудшает свои свойства из-за негативных факторов, таких как вытаптывание, езда автомобилей, плохое устройство дренажа [4]. Поэтому географическое расположение территории и её биологические исследования позволяют рационально и объективно выполнить предпроектный анализ участка, функциональное зонирование территории, а также отметить необходимые мероприятия по охране окружающей природной среды.

Помимо географического и эстетического факторов в экологической дисциплине существует понятие «гигиена». В её задачи входит формирование основ, которые оптимизируют полноценные условия положительного развития и необходимой охраны окружающей среды с позиции здоровья человека.

Один из ярких примеров применения гигиенических критериев – подземные системы для сортировки, сбора и хранения мусора.

Преимущества такого способа сбора и хранения мусора:

- нет неприятного запаха;
- мелкий и лёгкий мусор не разносится ветром;
- точки сбора мусора не способствуют размножению насекомых и других вредителей;
- точки сбора мусора не привлекают бродячих собак;
- рациональное использование дворовой территории;
- эстетичный внешний вид, т.к. контейнеры с мусором под землёй.

Кроме того, у некоторых моделей мусоросборных контейнеров могут быть заявлены следующие характеристики:

- автоматическая система пожаротушения;
- автоматическая система водоотвода;
- возможность как общего, так и отдельного сбора мусора.

Очистка сточных вод, а также производственных выбросов, формирование системы мусороудаления, внедрение современных инновационных установок, эффективная защита от воздействия шума и электромагнитных колебаний являются важнейшими частями природоохранных мер, которые разрабатываются в призме урбоэкологии. Эффективными эти действия становятся в сочетании с архитектурно-градостроительными методами, которые обеспечивают объективные решения в рамках установки инженерных систем и коммуникаций, а также проектирование инженерно-технических коммуникаций на соседствующих территориях [3].

Эстетическая составляющая урбоэкологии основывается на формировании такой окружающей среды, которая нацелена на организацию гармоничной визуальной городской среды, что является важным показателем качества жизни людей в городском пространстве.

В аспекты организации гармоничной визуальной среды входит термин «видеоэкология». Под видеоэкологией понимается научное направление, которое исследует человека в городской среде. В основе теории видеоэкологии лежит концепция о саккадах – свойстве глаз человека, которые могут совершать быстрые движения в определённых ритмах [8]. Подробно данная теория отражается в научных трудах В. А. Филина [8].

Автоматия саккад позволяет человеку рассматривать окружающую среду с интервалом, который обеспечивает прямое восприятие, к примеру, фасадов здания и его декора. Кроме этого, саккады глаз и интервал позволяет ориентироваться и совершать сравнение тех же фасадов. Изменение интервала, ориентации и амплитуды ритмов ведёт к нарушению рабочей функции глаза и восприятия окружающей среды [8]. В настоящее время архитектурное пространство города включает в себя различные виды и формы архитектурных объектов и сооружений. В большинстве случаев архитектурная среда – это прямые линии и углы, а также плоскости внушительных размеров. Поэтому визуальная среда включает в себя такие участки среды или поля, которые негативно отражаются на эмоциональном состоянии людей. Она разделяется на *гомогенные и агрессивные ви-*

зуальные поля. Всё это составляет неблагоприятную среду в местах обитания человека и приводит к росту числа психических заболеваний, увеличению количества людей, страдающих близорукостью, и ухудшению нравственности (см. рис. 1).



Рис. 1. Примеры архитектурной среды, комфортной и некомфортной для восприятия

*Гомогенной* считается видимая среда, где какие-либо детали отсутствуют, либо их количество очень мало:

- ограждение;
- стены здания;
- пустые торцы зданий;
- значительные размеры асфальтированных покрытий.

Скудная визуальная среда, т.е. окружающее пространство, включающее в себя простые элементы, объекты и отсутствие декоративной составляющей – это «дефицитная» среда. Нехватка зрительных элементов приводит к нарушению визуальной среды города. Она становится буквально плоской, серой массой, которая не вызывает ответной реакции у человека, тем самым становится дисконфортной.

Визуальная среда становится интересной в тех случаях, когда она насыщена декоративными деталями фасадов, тщательно подобранной цветовой картой и колористикой, шрифтовыми композициями, различными оконными переплётами, проработанной геометрической композицией застройки [5]. К примеру, ограждение – это вертикальная конструкция, обладающая защитной функцией. Кроме этого, ограждение может выглядеть как 1) глухая конструкция, которая может содержать в себе художественный или рекламный контент на вертикальной плоскости; 2) сооружение, состоящее из реек и столбов, частично открытое (рейки могут иметь различное направление по вертикали, тем самым составляя геометрический рисунок); 3) часто высаженный кустарник или деревья.

Таким образом, при исследовании гомогенной среды могут быть выделены отдельные признаки, которые с помощью определённых архитектурно-дизайнерских методик, основанных на экологическом подходе, помогут избежать при проектировании либо устранить при их обнаружении следующие позиции:

- исследование вертикальных плоскостей фасадов зданий и сооружений;
- выявление процентных соотношений плоских, одинаковых поверхностей;
- анализ и сбор данных, касающихся восприятия горожанами различных аспектов городской среды;
- рассмотрение городской среды через призму социальной психологии, урбанистики.

При исследовании гомогенной среды городское пространство рассматривается как ряд материальных характеристик элементов, объектов, полученных в результате когнитивного восприятия. При этом выделяются отдельные видимые человеком участки среды. Они могут быть гармоничными или агрессивными.



*Агрессивное видимое поле* – это пространство городской среды, которая включает в себя значимое количество повторяющихся, пёстрых элементов. Рассмотрим некоторые из них:

- архитектурные объекты и сооружения с крупными одинаковыми оконными проёмами;
- стены зданий или сооружений, которые имеют покрытие в виде материала с повторяющимся мелким рисунком или без покрытия;
- стены зданий с кирпичной кладкой;
- различные материалы с эффектом: перфорированные, гофрированные, алюминиевые, шифер и т.п. [6].

Самая комфортная для глаза визуальная среда – природа, в ней отсутствуют прямые линии.

Таким образом, в настоящее время комфортность городской среды зависит от многих критериев. Один из них – это экология, которая рассматривает городскую среду в различных аспектах (географических, эстетических, экономических и социальных), главной задачей которых становится исследование закономерностей художественного, архитектурного, градостроительного осмысления на основе безопасности и охраны окружающей среды и здоровья человека. Экология среды на сегодняшний день является частью проектирования архитектурной среды и становится актуальным вопросом для исследований учёных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Васильева, Н. А. Современный город как социо-экопространство: проблемы и перспективы / Н. А. Васильева // *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal). FILOZOFIA.* – 2015. – № 2. – С. 138-141.
2. Дизайн архитектурной среды: учебник для вузов / Г. Б. Минервин, А. П. Ермолаев, В. Т. Шимко, А. В. Ефимов, Н. И. Щепетков, А. А. Гаврилина, Н. К. Кудряшев. – М.: Архитектура-С, 2006. – 504 с.
3. Илья Варламов [Электронный ресурс] / YouTube, 2021. – Режим доступа: <https://www.youtube.com/user/ilyavarlamov> (дата обращения: 12.10.2021).
4. СП 82.13330.2016. Благоустройство территорий. Актуализированная редакция [Электронный ресурс]. – Взамен СНиП III-10-75; введ. 2017-06-17 / Техэксперт. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456054208> (дата обращения: 12.10.2021).
5. Теодоронский, В. С. Объекты ландшафтной архитектуры: учеб. пособие для вузов / В. С. Теодоронский, И. О. Боговая. – М.: МГУЛ, 2003. – 300 с.
6. Новикова, В. М. Проблемы видеоэкологии городской среды / В. М. Новикова, С. В. Повышева // *Известия МГТУ «МАМИ».* – 2013. – Т. 4. – № 1 (15). – С. 199-202.
7. Нуждина, А. В. Актуальные вопросы экологического дизайна общественных пространств / А. В. Нуждина, С. А. Колесников // *Творчество и современность.* – 2020. – № 1 (12). – С. 108-112.
8. Филин, В. А. Визуальная среда города: вестник международной академии наук / В. А. Филин. – М.: Московский центр «Видеоэкология», 2006. – 50 с.





Литвинова Н. В.  
N. V. Litvinova

**ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОМФОРТНОЙ СРЕДЫ В РАМКАХ МОБИЛЬНОЙ АДАПТАЦИИ ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ (НА ПРИМЕРАХ МИРОВОЙ ПРАКТИКИ)**

**FACTORS OF COMFORTABLE ENVIRONMENT FORMATION WITHIN THE FRAMEWORK OF MOBILE ADAPTATION OF PUBLIC SPACES (ON EXAMPLES OF WORLD PRACTICE)**

**Литвинова Надежда Владимировна** – ассистент кафедры «Дизайн архитектурной среды» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: nadyaklewer.21@gmail.com.

**Nadezhda V. Litvinova** – Assistant lecturer, Design of Architectural Environment Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: nadyaklewer.21@gmail.com.

**Аннотация.** В данной работе рассмотрена проблема создания современного комфортного общественного пространства. Определены основные факторы, по которым возможно выявить уровень и другие показатели существующей комфортности, а также сформулировать проблемы и системный подход к их решению. Мобильная адаптация в данной работе рассматривается как способ решения задач общественных территорий и создания в их границах полифункциональной среды, отвечающей современным требованиям социума. В статье рассмотрены методы исследования комфортности среды, которые использовали в своих научных работах специалисты урбанистики, архитектуры, дизайна, культурологии, социологии, экологии и географии.

**Summary.** This paper deals with the problem of creating a modern comfortable public space. The main factors are determined by which it is possible to identify the level and other indicators of the existing comfort, as well as to formulate problems and a systematic approach to their solution. Mobile adaptation in this work is considered as a way to solve the problems of public areas and create a multifunctional environment within their boundaries that meets the modern requirements of society. The article examines the methods of studying the comfort of the environment, which were used in their scientific works by specialists in urbanism, architecture, design, cultural studies, sociology, ecology and geography.

**Ключевые слова:** архитектурная среда, комфортная среда, мобильность, общественные пространства.

**Key words:** architectural environment, comfortable environment, mobility, public spaces.

УДК 721.012

Комфортность городской среды, в том числе разнообразие функций общественных зон и их эстетически-привлекательный вид, повышает активность деятельности и коммуникативности горожан, что способствует оживлению городских территорий и их безопасности [6]. Архитектор Ян Гейл отмечал, что городское пространство необходимо проектировать, основываясь не на нуждах транспорта, а следуя желаниям и потребностям горожан. Город необходимо конструировать на основе человеческой энергии, которая вырабатывается в процессе прямого взаимодействия людей с окружающей средой и обществом, т.е. основывается на количественном показателе пешеходов и велосипедистов [6].

Определение комфортной городской среды обширно и включает в себя множество показателей: содержание города и общественные отношения, учёт климатических особенностей, экономические и экологические параметры, использование инновационных технологий и т.д.

В рамках комфортности содержание города определяется системой с прослеживаемой иерархичностью расположения объектов, характеризуется степенью грамотности, гармоничности районирования и распределения связей между различными функциональными зонами. Обще-

ственные отношения как показатель комфортности оцениваются уровнем развития взаимоотношений и взаимодействий горожан. Экологический параметр характеризуется сохранённым природным потенциалом и системой зелёных территорий города. Экономический показатель устанавливает уровень распределения городского бюджета и его вложения в развитие средовых пространств, а также степень организации системы платежей. Уровень инновационных технологий показывает адаптивность общественной среды города под потребности горожан и окружающие условия на основе умных систем. Адаптация может быть раскрыта в использовании роботизированных систем при проектировании предметно-пространственной среды или в создании умной инфраструктуры и др.

Комфортность общественных пространств – это совокупность количественных и качественных показателей. Данное понятие охватывает урбанистические, экономические, экологические и социальные факторы и степень соответствия городской среды ментальным и физическим потребностям горожанина с любым социальным статусом. Р. Ольденбург в своих трудах отмечал, что публичные пространства – это место вне рамок дома и работы, оно нейтральное и лёгкое, играет роль средства от стресса, одиночества и отчуждения [2].

Комфортность публичной среды может характеризоваться следующими компонентами:

– Компонент «качество»: в мировой практике определение комфортности характеризуется понятием «liveability» или «quality of living» (с англ. «качество жизни»). Оценка качества городской среды включает в себя немало элементов: это температурный и шумовой комфорт, наличие опасных насекомых, пригодность уличных пространств для прогулок и отдыха и др. [8].

– Компонент «безопасность»: создание открытых пространств для людей разных социально-экономических групп, где они могут беспрепятственно и с чувством защищённости направляться по своим делам. Безопасность поддерживается также мягкими границами разделения территорий, понятной планировочной структурой города, полифункциональным наполнением среды, плавными переходами между различными функциональными зонами [6; 19].

– Компонент «масштабность» в городском пространстве: приспособленность публичных мест для эксплуатации жителями (пешеходами) с учётом их особенностей. Данное определение характеризуется следующими понятиями: «дистанционные» и «контактные» чувства, социальное поле зрения, сенсорное восприятие [6].

Для соблюдения параметров комфортности необходимо учитывать, что формирование современной архитектурной среды определяется динамикой городской системы, изменяющимися и увеличивающимися потребностями горожан, а также уровнем развития человечества в целом. Следовательно, это приводит к тому, что нельзя обойтись только традиционными способами благоустройства территорий, которые не адаптируют общественные пространства под стремительно развивающиеся запросы современного общества. Комплексное исследование общественных пространств по выведенным факторам комфортности позволит системно подойти к благоустройству территорий и на основе этого сформировать адаптивную среду. Объект адаптивного пространства – это модульная система динамических и автономных элементов, которая стремится к универсальным характеристикам, удовлетворяющим потребности и решающим проблемы определённых территорий.

В итоге для организации комфортных условий в городской среде необходимо учесть следующие факторы развития архитектурной среды общественных пространств:

- урбанистический;
- экологический;
- социальный;
- предметно-пространственный;
- функциональный [17; 18].

#### **Урбанистический фактор комфортности**

Понятие «урбанизм» определяется всеобщим социокультурным процессом, в социологию этот критерий введён Л. Виртом. Он отмечал, что процесс урбанизма – это не увеличение городского населения или количества городов, а определение качества жизни в городской системе [6].

Урбанистические исследования в мировой практике – это различные методы анализа городской структуры. Исследованиями в данном направлении занимались урбанисты Я. Гейл, К. Линч, культуролог Н. Анциферов, социолог А. Лефевр, Ю. Лотман и др.

Методика исследования городского организма Я. Гейлом определяется многоуровневой системой, состоящей из натурного исследования, количественной и качественной оценки и выявления проблем общественных пространств. Натурное исследование пространств проводится с помощью ежечасного наблюдения и фиксирования данных в течение дня. Информация о посетителях исследуемых мест собирается в будни и выходные дни, в разное сезонное время (зима/лето, осень/весна) [6; 15].

Рассмотрим применение данной методики на примере г. Бреста. Для анализа была выбрана территория пешеходной зоны центрального района города. Натурное исследование проводилось в будни и выходные дни во второй половине дня. В будние дни общественное пространство посетило 820 человек, а в выходные – 1240 человек: среди всего количества пешеходов собирались данные об их возрасте и гендерной составляющей, а также оценивалась их деятельность по использованию данного общественного пространства (см. рис. 1) [6; 15].

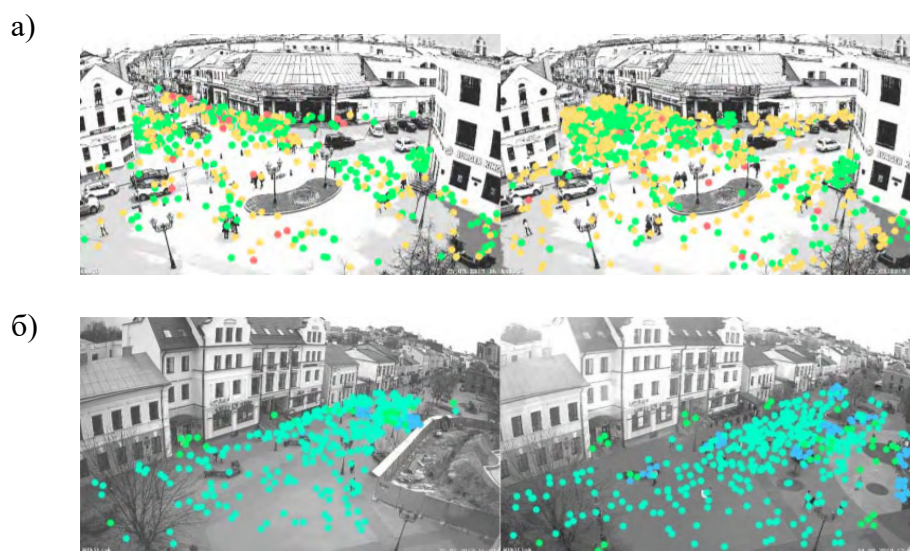


Рис. 1. Анализ территории: а – обозначение по возрастному критерию в рабочий и выходной день (слева направо); б – обозначение по характеру использования территории (слева направо)

Оценить уровень комфортности города можно с помощью сравнительного анализа. Необходимо выбрать несколько городов с высоким уровнем благоустройства и примерно одинаковой численностью по сравнению с исследуемым объектом (городом). Такое исследование проводилось компанией Boston Consulting Group, в ходе которого была определена конкурентоспособность г. Москвы по сравнению с 11 зарубежными городами: оценивались безопасность, благоустроенность общественных пространств, эстетический облик, уровень полифункциональности рекреационных территорий. Например, при сравнении городов по площади благоустроенных рекреационных участков и их пешеходной доступности выяснилось, что Москва занимает одну из лидирующих позиций: с 2011 по 2017 гг. увеличилось количество благоустроенных парков в два раза, следовательно, выросла безопасность и число пешеходов в дневное и вечернее время, увеличились посещаемость туристами и выручка бизнеса на благоустроенных территориях (см. рис. 2) [8].

По этой же методике бюро «Gehl Architects» под руководством Я. Гейла провело исследование пешеходных пространств центра Москвы. В процессе исследования урбанисты сравнивали пешеходные пространства различных городов, анализировали сценарии и поведение пешеходов, рассматривали негативное влияние транспорта, анализировали демографические, гендерные и



возрастные показатели, оценивали шум и рассматривали причины шумового загрязнения, а также оценивали функциональное наполнение и пешеходную активность на улицах Москвы. Были выбраны следующие общественные пространства: Тверская улица в Москве – предмет исследования, для сравнения выбраны Бродвей в Нью-Йорке и Елисейские поля в Париже. В итоге анализа определили, что на Бродвее больше пешеходов в 1,8 раз, чем на Тверской; на бульваре в Париже 62 % от общей площади отведено пешеходам, на Тверской же – всего 9 % (см. рис. 3) [6].



Рис. 2. Анализ парков г. Москвы

Городскую систему также эффективно исследовать с помощью семиотического подхода, которого придерживались Н. Анциферов, А. Лефевр, Ю. Лотман и другие урбанисты, социологи и культурологи.

Рис. 3. Сравнение общественных пространств: а – Бродвей, г. Нью-Йорк;  
б – Елисейские поля, г. Париж; в – ул. Тверская, г. Москва

Н. Анциферов следовал тезису, который раскрывал урбанизированную систему как инструмент для трансляции и хранения культурной информации – символических кодов. Город представляется текстом и системой знаков, которые являются компонентами улиц и кварталов, а также существуют как способ организации общественных пространств. В итоге данного исследовательского подхода было выявлено, что город обладает в первую очередь не физическими, а символическими чертами [9].

По А. Лефевру символические характеристики и текст города – это соответствующий образ жизни в городском пространстве и способ его производства. Для исследования и прочтения города А. Лефевр вывел метод ритм-анализа. Данный метод социолог открыл, наблюдая сверху из окна за улицами центра Парижа, за разнообразием движущихся потоков: толпы народа, передвигающиеся в различных направлениях с разными скоростями, разгоняющиеся и останавливающиеся автомобили, смесь разнообразных запахов и шумов. Ближе к утру, когда перечисленные ритмы почти стихают, появляются другие, более спокойные: дети идут в школу, раздаются одиночные выкрики – присутствуют признаки наступления нового дня; после на улицу выходят торговцы, а вслед за ними – туристы [1].

Ритм города – это повторяющиеся маршруты пешеходов и автомобилей, повторы сценариев, сопровождающиеся звуками и запахами, которые дают горожанам приобрести чувство времени и места [1].



Примером семиотического исследования города можно считать работу Ю. Лотмана о петербургском тексте. В своей работе он доказывал, что главные критерии описания места – это выведение семантической структуры, состоящей из константных элементов. Семиотические константы в итоге программируют текст культуры, который воздействует на восприятие определённого общественного пространства и на отношение к нему [1].

Городская система определяется смешением различных социальных и стилевых текстов и кодов, которые в совокупности выступают генератором новой информации. Тексты прошедших эпох генерируются кодовыми программами городов и их элементами: планом города, наименованиями улиц, архитектурным наполнением, городскими церемониями, традициями и обрядами и другими реликтами исторического прошлого.

Получается, что городской организм – это постоянно рождающий своё прошлое механизм, который взаимодействует и смешивается с настоящим. Семиотический подход к исследованию городских пространств даёт набор данных для проведения анализа смысловых связей и процессов, которые сливаются в единый кодовый текст города [1].

Урбанистический фактор комфортности основан на анализе данных исследования городской структуры и её транспортной системы, планировочного каркаса города, доступности территорий и их показателей интенсивности и актуальности использования.

#### **Экологический фактор комфортности**

Данный фактор комфортности определяется уровнем экологической обстановки, климатическими особенностями, качеством озеленения городских территорий, оценкой шумовых и визуальных загрязнений и адаптацией общественных пространств под них. Сам город описывается как экологическая система, состоящая из антропогенной и природной субструктур. Исследованиями, посвящёнными проблемам экологической комфортности в архитектурной среде, занимались Ю. С. Лебедев, В. Л. Глазычев, К. Курокава, Ж. Клеман, В. А. Нефедов, В. П. Арбатский, Е. А. Бобров.

Снижение уровня комфортности по рассматриваемому фактору объясняется стремительным ростом городов и революционными подходами в сфере градостроительства, автоматизацией строительства по типовому проекту и отторжением связи с естественной природой. Следовательно, в контексте экологического фактора комфортности возникает необходимость рассматривать следующие определения: видеоэкология, агрессивная среда, шумовое загрязнение, микроклимат города, а также феномен городского теплового острова [20].

Видеоэкология определяет состояние городского пейзажа: гармоничность и характер структуры окружающего пространства. Причинами видеозагрязнения являются некачественные архитектурно-планировочные решения в процессе создания городской среды. Люди большую часть информации обрабатывают с помощью зрения, визуально воспринимая городскую среду, следовательно, загрязнённое пространство может пониматься как перенасыщенное информацией или визуально монотонное [2].

В раздел видеоэкологии входят определения гомогенной среды и агрессивного поля. Гомогенность городской среды формируется из примитивных, бесструктурных или с отсутствующей текстурой объектов: голые стены, глухие ограждающие конструкции, асфальтное покрытие и др.

Агрессивная среда формируется большим количеством однотипных равномерно размещённых элементов на поверхностях архитектурного пространства: плитка на стенах и тротуарах, окна домов, гофрированные поверхности и т. д. [2].

Шумовое загрязнение прогрессирует из-за развития транспортной отрасли. Источниками шума в основном являются сооружения транспортной инфраструктуры, а также спортивные, торговые объекты и промышленные предприятия. Для решения проблем шумового загрязнения используют озеленение, устанавливают шумозащитные экраны и конструкции, используют звукопоглощающие материалы, меры по успокоению трафика.

Микроклимат – это климат приземного слоя атмосферы, на его формирование влияют географическое местоположение населённого пункта (принадлежность конкретному климатическому



поясу), характер рельефа и урбанизированной поверхности городской территории, степень загрязнения атмосферы и акваторий.

В процессе анализа микроклиматических условий исследуют общий климат территории населённого пункта, световые климатические характеристики, режим инсоляции и температуры, а также соответствующие территориальные метеорологические явления.

Важным критерием формирования микроклимата является альbedo, т. е. уровень отражающей способности поверхностей городской среды: тротуаров, почвы, водоёмов, газона и т. д. По причине сокращения площадей с высоким показателем альbedo, и особенно зелёных насаждений, образуется городской «остров тепла».

Данный экологический феномен характеризует повышение температурного режима в городской среде по сравнению с окружающей её местностью. Повышение температуры летом и повышение влажности зимой связано с геометрией поверхности городской ткани. Архитектурные объекты или комплексы могут влиять на интенсивность нагрева городских общественных пространств, могут блокировать потоки ветров, что уменьшает интенсивность конвективного охлаждения; также распространено формирование противоположного явления – ветровой «аэродинамической трубы». Следовательно, «остров тепла» снижает комфортность общественных пространств [16]. Для исследования данного феномена проводится мониторинг температурного режима городской среды: формируются модель «острова тепла» и система распределения городской энергии, анализируются данные теплового излучения в дневное и ночное время, производится сравнение температурных режимов городской территории с загородной местностью. В подобных исследованиях используются снимки в тепловом инфракрасном диапазоне, данные для которых взяты с результатов космической съёмки. Такая съёмка позволяет увидеть городскую систему «тёплых островов», отследить их пути формирования в пространстве и времени, проанализировать энергетическое воздействие различных объектов городской среды друг на друга (см. рис. 4).

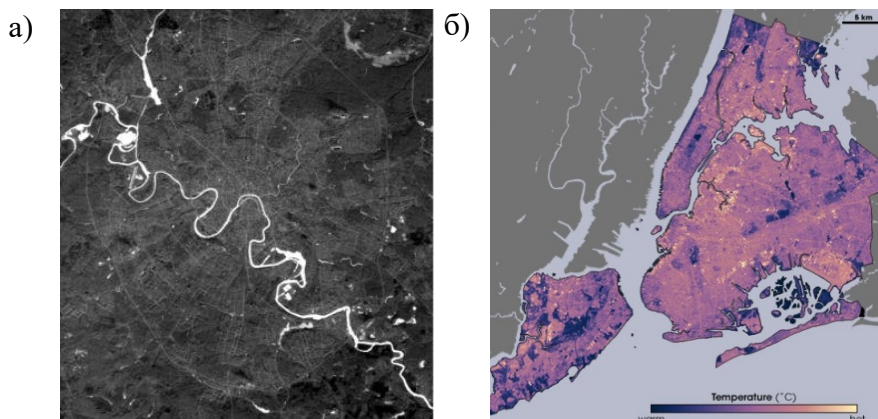


Рис. 4. Снимки местности городов с космического спутника для анализа температурного режима:  
а – фрагмент снимка в тепловом инфракрасном диапазоне территории Москвы;  
б – изображение температуры земной поверхности (LST) на территории Нью-Йорка

Для понимания существующих экологических проблем определённого общественного пространства необходимо провести локальные исследования, а также анализ всей территории города. Примером анализа по экологическому фактору комфортности являются исследования г. Смоленска. В ходе сравнительно-географического анализа выявлены микроклиматические особенности городской среды. Средняя температура за время наблюдений в городе оказалась выше температуры воздуха загородной местности: разница составила от 0,2 до 2,2 С°. Были проанализированы показатели влажности: в городе влажность воздуха ниже на 7,8 %, при этом облачность за городом ниже на 1 балл [4].

Для формирования комфортного экологического показателя общественного пространства в современном мировом проектировании используются биоадаптивные технологии, которые основаны на природных системах, структурах и механизмах. Такие технологии могут наделять архитектуру следующими свойствами адаптивности: трансформацией, мобильностью, модульностью, динамичностью.

### Социальный фактор

Рассматриваемый фактор определяется уровнем удовлетворённости социальных потребностей горожан при времяпрепровождении в определённом общественном пространстве. На создание комфортности по данному фактору влияют показатели демографической ситуации, динамика численности населения, психологическое восприятие городских пространств и другие социальные параметры. Вопросами и исследованиями в рамках создания социальной комфортности занимались А. В. Крашенинников, К. Линч, З. Н. Яргина, Д. Джекобс, А. Г. Раппапорт, А. Каплан.

Урбанист К. Линч в своей работе «Образ города» отмечает, что каждый человек формирует свой независимый образ окружения и несёт его в себе, в то же время группа людей может соглашаться с общими воспринимаемыми образами. Он предлагает исследовать город с помощью составления ментальных карт, которыми ранее пользовались в своих исследованиях психолог Э. Толмен и исследователь Ч. Тробридж. Построение ментальных карт как способ изучения городского организма предполагает оценку восприятия общественных пространств со стороны социальной значимости. В исследовании необходимо сравнить сформированный образ с визуальной действительностью [11].

В процессе организации ментальной карты урбанистом К. Линчем проводилось два основных исследования (см. рис. 5):

1. анализ городских пространств и архитектурного наполнения: отметка на карте элементов и их уровень образной значимости, взаимодействие между ними;
2. опрос жителей города, которые проводят время (живут, работают) на исследуемой территории, на тему восприятия среды и составления образов материального пространства [11].

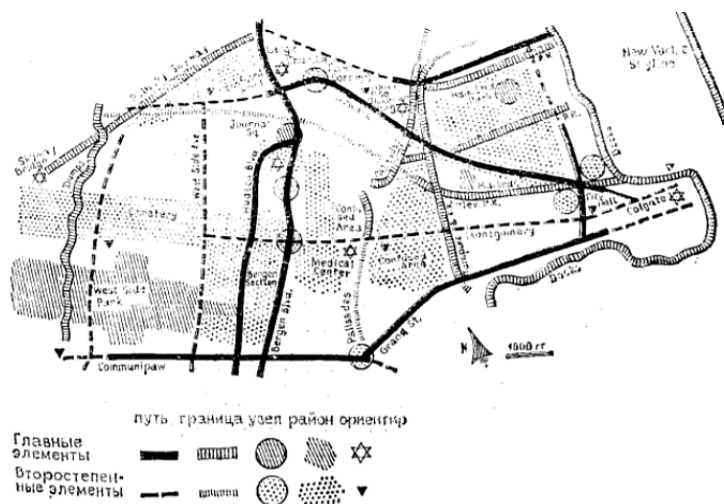


Рис. 5. Схема ментальная или диаграмма визуальной формы Джерси-Сити, автор К. Линч

Для анализа и изучения восприятия общественных пространств урбанисты пользуются методом автоэтнографии. Исследователь, ориентируясь на своё восприятие и ощущения, станет объектом исследования [5]. Этим же видом анализа пользовался специалист по гуманитарной географии Д. Спинни в своём мобильном исследовании города, передвигаясь на велосипеде. Также он доказал, что восприятие образа местности разными людьми похоже, иногда даже идентично [5].

Распространены опросные методы исследования, результаты которых помогут узнать общественное мнение, характер индивидуального и массового восприятия, а также мотивирующие факторы, настроение, ценности и потребности горожан.

### Предметно-пространственный и функциональный факторы комфортности

В рамках предметно-пространственного фактора исследуется местность определённого общественного пространства на характер статичности окружения, анализируются параметры и структура архитектурных ансамблей, уровень застроенности, ландшафтная конфигурация и т. д. Предметно-пространственная организация общественных пространств зависит во многом от архитектурного окружения, которое различается своими характеристиками в зависимости от расположения в городской системе. Для определения уровня комфортности и его увеличения необходимо проанализировать характер предметно-пространственной среды самой публичной территории.

Для проведения исследований по данному фактору можно воспользоваться методами визуального, композиционного анализа и выявления типологии. Пространственная среда может быть закрытого, открытого и комбинированного типа, в каждом из них поведение человека будет различаться, как и критерии оценки предметно-пространственной среды (см. рис. 6) [18].

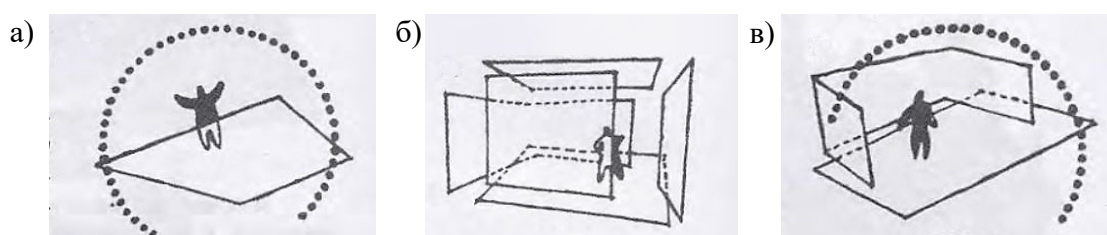


Рис. 6. Типы пространственной среды, схемы по В. Т. Шимко:

а – открытая; б – закрытая; в – комбинированная

К. Линч и Р. Архейм придерживаются мнения, что от типологии общественного пространства, образованного архитектурными объектами, зависят поведение и эмоции горожанина. На основе научных трудов Р. Архейма к характеристикам пространственной архитектурной среды можно отнести следующее:

- массы объектов: сравнение объёмов и промежуточное пространство между ними – плотность и разбавленность;
- динамика: вертикальное восприятие архитектурного ландшафта;
- пустоты и их параметры [3].

Большое влияние на зрительное (визуальное) восприятие горожанина оказывают характер и особенности пространственного формирования общественной среды. Необходимо при анализе, исследовании и организации публичной среды учитывать, что одно и то же пространство воспринимается по-разному в зависимости от угла зрения:

- фронтальный вид;
- объёмное восприятие;
- глубинное;
- панорамное (формирование силуэта) [21, 38].

Принцип анализа формирования визуального образа с помощью предметно-пространственных и архитектурно-планировочных приёмов можно рассмотреть на примере, предложенном в трудах В. Т. Шимко. Для анализа он взял фрагмент публичной среды, запечатлев его в кадре, далее проводил системный разбор по объектам и элементам, образующим пространство:

- общая картина (см. рис. 7, к);
- архитектурные объёмы (см. рис. 7, а);
- плоскостные сооружения (см. рис. 7, б);
- детализация архитектурных объектов (см. рис. 7, в);
- элементы монументально-декоративного искусства (см. рис. 7, г);
- средства информации (визуальная коммуникация) (см. рис. 7, д);
- городское оборудование (см. рис. 7, е);

- элементы ландшафта (см. рис. 7, ж);
- второй план, панорамы (см. рис. 7, и) [21, 41].

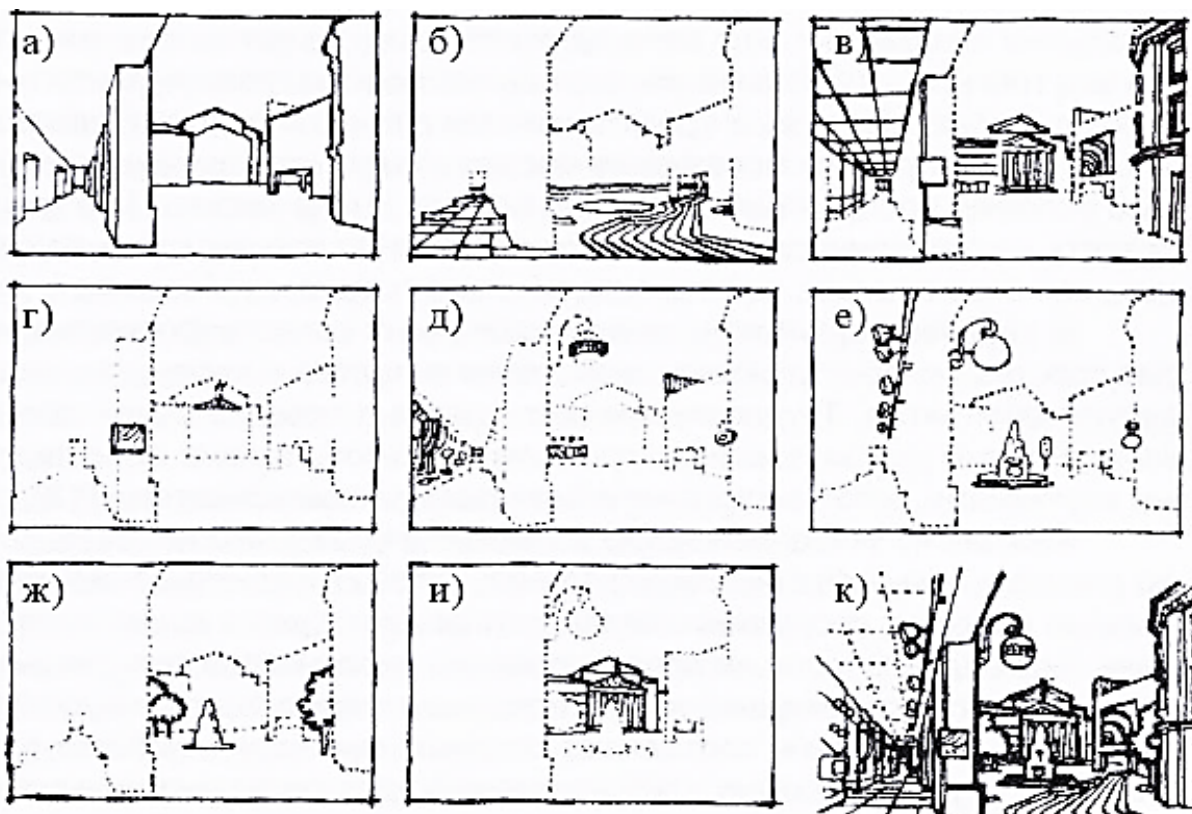


Рис. 7. Анализ средств формирования архитектурной среды: а – архитектурные объёмы; б – плоскостные сооружения; в – детализация архитектурных объектов; г – элементы монументально-декоративного искусства; д – средства информации; е – городское оборудование; ж – элементы ландшафта; и – второй план, панорамы; к – общая картина

Характер образования предметно-пространственной среды общественной территории зависит от функций окружающих зданий. Функциональное разнообразие является фактором многообразия пространственных форм среды [3].

Считается, что в проектировании современных публичных пространств архитектурная среда организуется вокруг функции. Формы общественной жизни в эпоху технологий не требуют собственного закреплённого пространства – они мобильны. Получается, общественные пространства должны обладать способностью к трансформации для проведения различных мероприятий в разное время (суток, недели, сезонов) [10; 13].

Таким образом, на базе методов и подходов исследования архитектурной среды отмечается корреляционная связь факторов комфортности, их взаимозависимость предоставляет возможность сформировать системный подход к анализу территорий, который позволит более целостно оценить недостатки благоустройства и скорректировать приоритеты будущих трансформаций и улучшений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов, Н. О. Город в дискурсе семиотики / Н. О. Анисимов // *Juvenis scientia*. – 2018. – № 12. – С. 33-35.
2. Арбатский, В. П. Социально-экологические аспекты формирования архитектурной среды городских уличных пространств на примере Новосибирска / В. П. Арбатский, Р. Ю. Зимин // *Творчество и современность*. – 2019. – № 1 (9). – С. 62-66.



3. Аркхейм, Р. Динамика архитектурных форм / Р. Аркхейм; пер. с англ. В. Л. Глазычева. – М.: Стройиздат, 1984. – 192 с.
4. Бобров, Е. А. Социально-экологические проблемы крупных городов и пути их решения / Е. А. Бобров // Региональные геосистемы. – 2011. – № 15 (110). – С. 199-208.
5. Бунич, Е. А. Методы изучения восприятия городского пространства / Е. А. Бунич // Мониторинг. – 2012. – № 6 (112). – С. 43-47.
6. Гейл, Я. Города для людей / Я. Гейл; пер. с англ. А. Токтонова. – М.: Крост, 2012. – 276 с.
7. Ильина, И. Н. Качество городской среды как фактор устойчивого развития муниципальных образований / И. Н. Ильина // Имущественные отношения в РФ. – 2015. – № 5 (164). – С. 69-82.
8. Исследование развития комфортной городской среды в Москве и ведущих городах мира: отчёт / The Boston Consulting Group, 2018. – 26 с.
9. Ковалёва, Т. Н. Основные концептуальные подходы к исследованию городского пространства / Т. Н. Ковалёва // Вестник КРУ МВД России. – 2014. – № 1. – С. 97-99.
10. Лагодина, Е. В. Комфортная городская среда глазами простого горожанина / Е. В. Лагодина // Северо-Кавказский психологический вестник. – 2013. – № 2. – С. 9-12.
11. Линч, К. Образ города / К. Линч; пер. с англ. В. Л. Глазычева; сост. А. В. Иконников; под ред. А. В. Иконникова. – М.: Стройиздат, 1982. – 328 с.
12. Ольденбург, Р. Третье место: кафе, кофейни, книжные магазины, бары, салоны красоты и другие места «тусовок» как фундамент сообщества / Р. Ольденбург; пер. с англ. А. Широкановой. – М.: Новое литературное обозрение, 2014. – 456 с.
13. Паченков, О. В. Публичное пространство города перед лицом вызовов современности: мобильность и «злоупотребление публичностью» / О. В. Паченков // Независимый филологический журнал. – 2012. – № 117. – С. 419-440.
14. Петровская, О. В. Современные теории развития урбанизма / О. В. Петровская // Научная мысль Кавказа. – 2014. – № 4. – С. 31-36.
15. Радионов, Е. А. Экспериментальные методы исследования общественных пространств / Е. А. Радионов; науч. рук. Т. А. Панченко // Актуальные проблемы архитектуры и градостроительства: материалы Республиканской студенческой научно-технической конференции, 75-й студенческой научно-технической конференции БНТУ. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 141-144.
16. Романова, Е. М. Методы использования систематизированной климатической и микроклиматической информации при развитии и совершенствовании градостроительных концепций / Е. М. Романова, Е. О. Гобарова, Е. Л. Жильцова. – СПб.: Гидрометеиздат, 2000. – 159 с.
17. Сохацкая, Д. Г. Предметно-функциональный код как компонент дизайн-кода / Д. Г. Сохацкая // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2019. – № IV-2 (40). – С. 62-66.
18. Сохацкая, Д. Г. Символический код как компонент дизайн-кода культурного пространства города Комсомольска-на-Амуре / Д. Г. Сохацкая // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2020. – № VIII-2 (48). – С. 52-57.
19. Сысоева, Е. А. Принципы формирования общественных пространств для исторической части городов / Е. А. Сысоева, К. Н. Дахнюк // Градостроительство и архитектура. – 2020. – № 2. – С. 93-99.
20. Филин, В. А. Видимая среда в городских условиях как экологический фактор. Урбоэкология / В. А. Филин. – М.: Наука, 1990. – С. 45-61.
21. Шимко, В. Т. Архитектурно-дизайнерское проектирование городской среды / В. Т. Шимко. – М.: Архитектура-С, 2006. – 384 с.



## НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ SCIENTIFIC LIFE



9 октября 2021 г. ушёл из жизни выдающийся человек и личность, учёный, изобретатель, доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение и металлургия» Комсомольского-на-Амуре государственного университета, заслуженный изобретатель РСФСР

**МАРЬИН БОРИС НИКОЛАЕВИЧ**  
(15.04.1948 – 09.10.2021)

Вся жизнь Бориса Николаевича была посвящена науке, производству и изобретательству. Осталась добрая память и большое научное наследие, которое ещё многие годы будет востребовано при подготовке высококвалифицированных специалистов и учёных в машиностроении и металлургии.

Марьин Борис Николаевич родился 15 апреля 1948 г. в г. Комсомольске-на-Амуре. После окончания средней школы в 1966 г. пришёл на авиационный завод им. Ю. А. Гагарина сборщиком-клепальщиком. Без отрыва от производства в 1977 г. закончил Комсомольский-на-Амуре политехнический институт по специальности инженер-механик по самолётостроению, в 1984 г. – двухгодичный курс в Хабаровском институте патентоведения, а в 1991 г. – заочную аспирантуру Национального института авиационных технологий (г. Москва). За период с 1966 по 1984 гг. прошёл путь от рабочего до начальника цеха. В 1985 г. назначен заместителем главного технолога, а с августа 2000 г. – главным научным сотрудником.

При его непосредственном участии на объединении созданы комплексно-механизированные участки по изготовлению высокоресурсного трубопровода и производству деталей из листовых и профильных заготовок. Опубликовано более 450 научных трудов, в том числе 40 монографий, 3 справочника, 21 учебное пособие, 131 изобретение, 9 полезных моделей и научная идея, создана научная школа по методам обработки материалов давлением, широко известная и общепризнанная как в России, так и за рубежом.

Борис Николаевич Марьин в 1991 г. защитил кандидатскую, в 1998 г. – докторскую диссертацию, в 2000 г. присвоено учёное звание профессора. Он являлся членом учёного, докторских диссертационных советов и государственных аттестационных комиссий ряда университетов и институтов Дальнего Востока, входил в состав редколлегии и редакционных советов научно-технических журналов: «Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением», «Сборка в машиностроении и приборостроении», «Проблемы машиностроения и автоматизации». Подготовил 12 кандидатов и 7 докторов технических наук.

Присвоены почётные звания «Заслуженный изобретатель РСФСР» (1989 г.), «Почётный авиастроитель» (1996 г.), Лауреат I Всероссийского конкурса «Инженер года 2000», «Почётный член ВОИР» (2002 г.). Награждён «Крестом почёта I степени» (Франция, 1998 г.), орденом Святого Иоанна Иерусалимского «Мальтийский крест» (2000 г.) и Бельгийским крестом II степени «За заслуги в области изобретательства» (2002 г.); медалями: «Золотая медаль ВДНХ СССР» (1991 г.), «100 лет со дня рождения С. А. Лавочкина» (2000 г.), «Академик РАН Н. А. Пилюгин» (2002 г.), «150 лет со дня рождения В. Г. Шухова» (2003 г.), золотыми, серебряными и бронзовыми медалями на Всемирном и международных салонах изобретений в «Брюссель-Эврика», Женеве, Париже «Конкурс Лепин», Сеуле и Москве «Архимед» (1995 – 2006 гг.), медалью энциклопедии «Лучшие люди России» (2005 г.).

Разработаны приоритетные (новые) направления в науке и технике:

- авторские свидетельства СССР и патенты РФ на изобретения, в том числе имеющие практическое использование в различных сферах деятельности и в особенности в промышленности;

- способы, оборудование и методы деформирования, сварки, термообработки, сборки изделий и летательных аппаратов. Подтверждено более чем 16 отзывами научной общественности институтов Российской академии наук, головных научно-исследовательских институтов, ведущих вузов при рассмотрении кандидатской и докторской диссертаций, присвоением учёного звания профессора.

Наименование основных монографий, справочников, учебников, докладов:

1. Опыт разработки и внедрения технологических процессов формообразования деталей из цельнонатянутых трубных заготовок // Материалы конференции «Прогресс в области обработки труб». – Хабаровск: ЦНИИТС, 1984. – С. 59-64.

2. Интенсификация технологии сортовой прокатки / Б. Н. Марьин, С. А. Хохлов, Т. В. Новикова, В. В. Лиманкин, В. А. Ким, С. Б. Марьин // Образование, наука и производство: материалы междунар. техн. конф., Комсомольск-на-Амуре, 27-30 сент. 2010 г. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2010. – Т. 2. – С. 343-350.

3. Интенсификация формообразования деталей из трубчатых заготовок. – М.: Машиностроение, 1996. – 168 с.

4. Справочник кузнеца-штамповщика. – М.: Изд-во МАИ, 1996. – 352 с.

5. Специальные технологии литейного производства / Б. Н. Марьин, А. И. Евстигнеев, Э. А. Дмитриев и др. – Хабаровск: Хабаровская типография, 2009. – 391 с.

6. О самопроизвольном сжатии полоцилиндрического дугового разряда. Диплом на научную идею № А-93 от 08.01.1998. Регистрационный № 93.

7. Современные технологии авиастроения. – М.: Машиностроение, 1999. – 832 с.

8. Технологическое обеспечение аэродинамических обводов современного самолёта. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 427 с.

9. Газовые системы летательных аппаратов. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – 448 с.

10. Обработка поверхностей в металлургии и машиностроении / Б. Н. Марьин, В. А. Ким, В. В. Лиманкин, В. И. Шпорт, С. Б. Марьин. – Владивосток: Дальнаука, 2011. – 421 с.

11. Эксплуатация и ремонт оборудования цехов обработки металлов давлением / Б. Н. Марьин, Э. А. Дмитриев, В. В. Куриный, К. В. Волков, Н. П. Куриная, С. Б. Марьин, В. И. Шпорт. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2011. – 108 с.

12. Средства и методы неразрушающего контроля качества продукции / Б. Н. Марьин, О. В. Башков, В. А. Ким, А. И. Евстигнеев, О. А. Грачева, С. Б. Марьин, Т. И. Башкова, Ю. С. Андреевская. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2011. – 143 с.

Развиты новые научные направления по технологии производства летательных аппаратов и металлургии, в частности по изготовлению высокоресурсного трубопровода и производству штамповарных конструкций в ОКБ им. Сухого (Москва), Национальном институте авиационных технологий (НИАТ) (Москва), Комсомольском-на-Амуре авиационном производственном объединении (КНААПО), Российском государственном технологическом университете им. К. Э. Циолковского (МАТИ) (Москва), ОАО «Амурметалл».

Проработав с ним много лет плечом к плечу, занимаясь строительством самолётов и продвижением прикладных научных разработок, мы всегда видели в нём профессионала и учёного, талантливого изобретателя и генератора идей, направленных на создание новых технологий в области металлообработки и сборки летательных аппаратов.

Светлая память о Борисе Николаевиче Марьине навсегда останется в наших сердцах!

Ректорат, отдел редакции журнала «Учёные записки КНАГТУ», коллеги и друзья,  
Член коллегии Военно-промышленной комиссии Российской Федерации В. И. Шпорт

УЧЁНЫЕ ЗАПИСКИ КНАГТУ:  
НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ 2021

**АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА**

**Гусева Р. И., Гусева Ж. И.**

МОДУЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА  
ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И УЧЁТА ОТКАЗОВ  
КОМПЛЕКТУЮЩИХ ИЗДЕЛИЙ ВЕРТОЛЁТА

**ЭНЕРГЕТИКА**

**Шаломов В. И.**

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЗАМЕЩАЮЩЕЙ ТУРБИНЫ  
С ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ СВЕЖЕГО ПАРА ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО  
ПЕРЕВООРУЖЕНИЯ ТУРБОУСТАНОВОК СЕМЕЙСТВА Т-100

**Ющенко Л. В.**

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ  
ПЕРЕМЕЩАЮЩЕГОСЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

**Ким К. И., Ким К. К., Иванов С. Н.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОВ, ИНДУЦИРОВАННЫХ В ЖИДКОСТИ С ТЕНЗОРНОЙ  
ПРОВОДИМОСТЬЮ БЕГУЩИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

**Ким К. И., Ким К. К., Иванов С. Н.**

КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ РЕЖИМА САМОВОЗБУЖДЕНИЯ АСИНХРОННОГО  
ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

**УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА**

**Андрианов И. К..**

ПОСТРОЕНИЕ ОБОБЩЁННОГО КРИТЕРИЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОНКУРИРУЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ  
ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОВОГО  
И СИЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

**Попова О. В., Григорьев Я. Ю., Жарикова Е. П., Григорьева А. Л.**

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ОСВЕЩЁННОСТИ

**Григорьева А. Л., Григорьев Я. Ю., Ломакина Н. С., Хряпченко К. Д., Альхименко И. Н., Чепурных М. А.**

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ  
НА ПРЕДПРИЯТИЯХ И СУДАХ ЛЕДОВОГО ПЛАВАНИЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ  
СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

**Иванов С. Н., Колесник М. Б., Колошенко Ю. Б., Просолович А. А., Ким К. К.**

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВЫБОРА И АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ  
ПЕРЕДАТОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
С УЧЁТОМ ДЕЙСТВУЮЩИХ НАПРЯЖЕНИЙ

**Максимова Н. А., Черный С. П., Сухоруков С. И.**

ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗВИТЫХ НЕЧЁТКИХ СИСТЕМ С АЛГОРИТМОМ  
ВЫВОДА МАМДАНИ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Муллер Н. В., Младова Т. А.**

АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ТРАВМАТИЗМА  
С ПОМОЩЬЮ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

**Александров С. Ю.**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ ЖИДКИМ МЕТАЛЛОМ КРИСТАЛЛИЗАТОРА  
УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКИ СТАЛИ ПРИ СВОБОДНО ВРАЩАЮЩЕМСЯ  
ПОГРУЖНОМ СТАКАНЕ



**Амосова Е. В., Кикелин Д. С.**

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗОН ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВЗВЕСЬЮ И ДРУГИМИ ПРИМЕСЯМИ

**Андрианов И. К.**

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ОБОЛОЧЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОВОГО И СИЛОВОГО НАГРУЖЕНИЯ

**Боровик К. Г., Леонтьев Д. В., Харитонов Д. И.**

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ЧИСЛЕННОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ПОРИСТЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ

**Вейна В. С., Морковин А. В.**

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ТИПА МНОГОСЛОЙНЫЙ ПЕРСЕПТРОН ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ФУНКЦИИ ПРОГИБА БАЛКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ НАГРУЗКИ

**Иванов С. Н., Ким К. К., Просолович А. А., Хисматулин М. И.**

АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Канахин И. В., Григорьева А. Л., Хромов А. И., Григорьев Я. Ю., Машевский В. А.**

РАСТЯЖЕНИЕ СЖИМАЕМОЙ ПОЛОСЫ С НЕПРЕРЫВНЫМ ПОЛЕМ СКОРОСТЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

**Кузьмичев Е. Н., Николенко С. В., Власенко В. Д., Дроздов Е. А.**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПЕРЕПЛАВЕ

**Младова Т. А., Муллер Н. В.**

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕДЕНИЯ СВАИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НАКЛОННОЙ ВЫДЕРГИВАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ

**Рубан К. Е., Бахматов П. В.**

РАСЧЁТ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩЕЙ ЗАВИСИМОСТЬ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СВАРНЫХ ШВОВ СПЛАВА АМг5

**Соснин А. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н.**

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЁННОЙ ПОКОВКИ В УСТРОЙСТВЕ ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛА

**Иванов С. Н., Колесник М. Б., Колошенко Ю. Б.**

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ СОВМЕСТИМОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ЛИНЕЙНЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

**Игнатьев Ф. Ю., Колесникова О. В., Лелюхин В. Е.**

ИССЛЕДОВАНИЕ СХОДИМОСТИ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

**Колесникова О. В., Рупинец И. С.**

ВЛИЯНИЕ СЕРИЙНОСТИ НА СТРАТЕГИЮ КОМПЛЕКСНОЙ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫМ ПРОИЗВОДСТВОМ

**Соловьев В. А., Малюкова А. И.**

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ РУБИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

**Фецов С. С.**

О МОДЕЛИРОВАНИИ НЕСТАЦИОНАРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПОРИСТЫХ САМОРАЗОГРЕВАЮЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ОБЪЕМОВ

**Феоктистов С. И., Андрианов И. К.**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТОЛСТОСТЕННЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБОЛОЧЕК, НАГРУЖЕННЫХ ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ



**Феоктистов С. И., Андрианов И. К.**

УРАВНЕНИЯ СОВМЕСТНОСТИ ЛОГАРИФМИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ В КООРДИНАТАХ ЭЙЛЕРА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

**Бердоносов В. Д., Недиков И. О., Шамак В. А., Светлаков А. А.**

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА РОЯ ПЧЁЛ

**Колесник М. Б., Просолович А. А.**

АНАЛИЗ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПРИ ОСЕВЫХ НАГРУЗКАХ

**Купова А. В., Соловьев В. А., Светлаков А. А., Челухин В. А.**

СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СТАТИЧЕСКИМ ТИРИСТОРНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ С НЕЧЁТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ В СИСТЕМЕ С ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ

**Белокопытов А. Р., Гуляев А. В., Березнев А. М., Тен Е. Е., Фокин Д. С.**

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИЯ ПОВЫШАЮЩЕЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЭКОСИСТЕМЫ INDUSTRIAL IOT

**Попова О. В., Григорьев Я. Ю., Жарикова Е. П., Григорьева А. Л.**

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

## **МАШИНОСТРОЕНИЕ**

**Иванищев Ю. Г., Давыдов В. М.**

ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ (НОРМАЛИЗОВАННОЙ И НАТУРАЛЬНОЙ) НА ИХ АДЕКВАТНОСТЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

**Пицык В. С., Дмитриев Э. А., Муравьев В. И.**

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ФИЗИЧЕСКОГО КОНТАКТА НЕРАЗЪЁМНОГО СОЕДИНЕНИЯ, СОЗДАННОГО ХОЛОДНОЙ ТУГОЙ ПОСАДКОЙ ВАЛА ВО ВТУЛКУ ИЗ СПЛАВА ОТ4-1

**Феоктистов С. И.**

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСТЯГИВАЮЩИХ УСИЛИЙ ВДОЛЬ ОБРАЗУЮЩЕЙ ПУАНСОНА С УЧЁТОМ ТРЕНИЯ ПРИ ИЗГИБЕ С РАСТЯЖЕНИЕМ

**Щелкунов Е. Б., Виноградов С. В., Щелкунова М. Е., Карпенко В. А., Красиков Н. А.**  
МЯГКИЕ РОБОТЫ

**Бабко А. П., Муравьев В. И.**

ЗАВИСИМОСТЬ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО СВАРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И КАЧЕСТВА ВЫПОЛНЕНИЯ СВАРНОГО ШВА ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

**Белан Б. Р., Богданова Н. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н.**

НОВЫЕ МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОКСИДНОГО СЛОЯ ПРОТЯЖЁННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТРУБНЫХ ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЕЙ

**Богданова Н. А., Жилин С. Г., Комаров О. Н.**

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЁННОЙ ПРЕССОВКИ ИЗ ВОСКООБРАЗНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ЭКСТРУЗИОННОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ПОРОШКОВОГО ТЕЛА

**Гостевская А. Н.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОНТАКТНОЙ СТЫКОВОЙ СВАРКИ НА ЗОНУ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ РЕЛЬСОВ МАРКИ Э76ХФ

**Григорьев В. В., Муравьев В. И., Бахматов П. В.**

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ НЕРАЗЪЁМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ СИЛОВЫХ ТИТАНОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ, ВЫПОЛНЕННЫХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКОЙ





**Иванкова Е. П.**

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ И СТРУКТУРЫ МНОГОСЛОЙНЫХ ОБОЛОЧКОВЫХ ФОРМ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

**Бахматов П. В., Фролов А. В., Кравченко А. С.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНИКИ МАНИПУЛИРОВАНИЯ РАБОЧИМ ТОРЦОМ ЭЛЕКТРОДА ПРИ TIG СВАРКЕ НА КАЧЕСТВО ФОРМИРОВАНИЯ ШВА

**Красиков Н. А., Щелкунов Е. Б.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ ПРИ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ В ПАКЕТАХ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Попов А. В., Предеин В. В., Комаров О. Н.**

ВЛИЯНИЕ ПОДГОТОВКИ ШИХТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ФОРМИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ОТЛИВОК, ПОЛУЧАЕМЫХ АЛЮМОТЕРМИЕЙ

**Попов А. В., Предеин В. В., Комаров О. Н., Барсукова Н. В.**

ПОВЫШЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ АЛЮМОТЕРМИЕЙ С ДОБАВЛЕНИЕМ В СОСТАВ ТЕРМИТНОЙ СМЕСИ ШЕЕЛИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА

**Саблин П. А., Щетинин В. С.**

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МЕХАНООБРАБОТКИ С ПОМОЩЬЮ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕСКОНТАКТНЫХ ОПОР

**Старцев Е. А., Бахматов П. В., Михайлов К. А., Соболев Б. М.**

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО НАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ ПОРОШКОВОЙ СВАРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ НА ПРОЦЕСС ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

**Ткачева А. В., Абашкин Е. Е.**

ВЛИЯНИЕ СОВМЕЩЁННОГО ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ В НЕРАЗЪЁМНОМ СОЕДИНЕНИИ ИЗ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

**Хабибов М. М., Рубан К. Е., Бахматов П. В.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА АВТОМАТИЧЕСКОЙ РАЗМЕРНОЙ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ

**Кравченко Е. Г., Алтухова В. В., Серёдкина Е. А., Гамаюнова А. С.**

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ КОНТРОЛЯ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

**Рахчеев В. Г., Максимов И. С., Галанский С. А., Мустафин А. Г.**

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ ГОЛОВОК РЕЛЬСОВ ПРИ ШЛИФОВАНИИ

**Щелкунов Е. Б., Виноградов С. В., Щелкунова М. Е., Карпенко В. А.**

РАБОЧИЙ ЭЛЕМЕНТ МЯГКОГО ЗАХВАТНОГО УСТРОЙСТВА

**Марьин С. Б., Щербатюк Г. А., Кириллин В. Д., Пак М. И.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДАЧИ СРЕДНЕЙ ЧАСТИ ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ С ПОДПОРОМ

**Кравченко Е. Г., Отряскина Т. А., Шершнёв А. А.**

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

#### **МЕТАЛЛУРГИЯ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ**

**Кычкин А. А., Лебедев М. П., Ананьева Е. С., Кычкин А. К., Туисов А. Г.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ КАРБИДА КРЕМНИЯ НА УПРУГО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ЭПОКСИДНОГО СВЯЗУЮЩЕГО

**Ри Хосен, Ри Э. Х., Живетьев А. С., Ким Е. Д.**

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ БОРИДОСОДЕРЖАЩИХ ПОРОШКОВ ХРОМА МАГНИЙТЕРМИЧЕСКИМ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ В ИОННЫХ РАСПЛАВАХ



## **НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА**

**Коротеева Л. И.**

АНАЛИЗ ПРИЧИН ПРИОСТАНОВЛЕНИЙ И ОТКАЗОВ В ОСУЩЕСТВЛЕНИИ  
ГОСУДАРСТВЕННОГО КАДАСТРОВОГО УЧЁТА ОБЪЕКТОВ НЕДВИЖИМОСТИ

**Младова Т. А., Муллер Н. В.**

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ГРАНИЦ ЗОН ЗАТОПЛЕНИЯ НА ТЕРРИТОРИИ  
ГОРОДА КОМСОМОЛЬСКА-НА-АМУРЕ

**Никифорова Г. Е., Ждакаева М. В., Литовкина А. А.**

РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА БИОИНДИКАЦИИ КАК ИНСТРУМЕНТА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА  
ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ГОРОДА

## **СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

**Гринкруг Н. В., Чусова Е. А.**

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ОРГАНИЗАЦИИ ИНТЕРЬЕРОВ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

**Галкина Е. Г., Зубкова К. С.**

АНАЛИЗ УСПЕШНОГО ОПЫТА ОРГАНИЗАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ ЖИЛЫХ КВАРТАЛОВ В РОССИИ

**Галкина Е. Г., Полещук А. Д.**

ДИЗАЙН-КОНЦЕПЦИЯ БЛАГОУСТРОЙСТВА ПАРКА КУЛЬТУРЫ И ОТДЫХА  
«СУДОСТРОИТЕЛЬ» (Г. КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ)

**Гринкруг Н. В., Михайлова Т. М.**

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ПАНЕЛЬНОМ ДОМОСТРОЕНИИ

**Дзюба В. А., Погорельских И. В., Сайдамирова О. А.**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
С МУФТОВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ АРМАТУРЫ

**Гринкруг Н. В., Меньшикова В. А.**

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЛАНДШАФТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ИХ ВЛИЯНИЕ  
НА АРХИТЕКТУРУ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ И СТРОИТЕЛЬСТВО

**Сохацкая Д. Г., Зубкова К. С.**

ЭКОЛОГИЯ КАК ОДИН ИЗ КРИТЕРИЕВ КОМФОРТНОСТИ ЖИЛОГО КВАРТАЛА

**Литвинова Н. В.**

ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОМФОРТНОЙ СРЕДЫ В РАМКАХ МОБИЛЬНОЙ АДАПТАЦИИ  
ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ (НА ПРИМЕРАХ МИРОВОЙ ПРАКТИКИ)

## **НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ**

**Марьин С. Б., Куриный В. В., Вялов А. В.**

К ЮБИЛЕЮ КАФЕДРЫ «АВИАСТРОЕНИЕ»: ИСТОРИЯ КАФЕДРЫ  
ПОСВЯЩАЕТСЯ СВЕТОЙ ПАМЯТИ ВЫДАЮЩЕГОСЯ УЧЁНОГО  
ВЛАДИМИРА АЛЕКСЕЕВИЧА КИМА

**Марьин С. Б., Куриный В. В., Вялов А. В.**

К ЮБИЛЕЮ КАФЕДРЫ «АВИАСТРОЕНИЕ»: ИСТОРИЯ СТУДЕНЧЕСКОГО КОНСТРУКТОСКОГО  
БЮРО САМОЛЁТОСТРОИТЕЛЬНОГО ФАКУЛЬТЕТА  
ПОСВЯЩАЕТСЯ СВЕТОЙ ПАМЯТИ ВЫДАЮЩЕГОСЯ УЧЁНОГО И ИЗОБРЕТАТЕЛЯ  
БОРИСА НИКОЛАЕВИЧА МАРЬИНА

# Содержание

Научное издание

## ЭНЕРГЕТИКА

Ким К. И., Ким К. К., Иванов С. Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКОВ, ИНДУЦИРОВАННЫХ В ЖИДКОСТИ С ТЕНЗОРНОЙ  
ПРОВОДИМОСТЬЮ БЕГУЩИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ..... 4

Ким К. И., Ким К. К., Иванов С. Н.

КРИТЕРИИ УСТОЙЧИВОСТИ РЕЖИМА САМОВОЗБУЖДЕНИЯ АСИНХРОННОГО  
ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ..... 11

## УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Феоктистов С. И., Андрианов И. К.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТОЛСТОСТЕННЫХ  
ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБОЛОЧЕК, НАГРУЖЕННЫХ ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ ..... 18

Феоктистов С. И., Андрианов И. К.

УРАВНЕНИЯ СОВМЕСТИМОСТИ ЛОГАРИФИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ  
В КООРДИНАТАХ ЭЙЛЕРА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ  
ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ ..... 26

Бердоносов В. Д., Недиков И. О., Шамак В. А., Светлаков А. А.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ  
ОПТИМИЗАЦИИ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА РОЯ ПЧЁЛ ..... 31

Колесник М. Б., Просолович А. А.

АНАЛИЗ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АСИНХРОННОГО  
ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПРИ ОСЕВЫХ НАГРУЗКАХ..... 43

Купова А. В., Соловьев В. А., Светлаков А. А., Челухин В. А.

СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СТАТИЧЕСКИМ ТИРИСТОРНЫМ  
КОМПЕНСАТОРОМ С НЕЧЁТКИМ РЕГУЛЯТОРОМ В СИСТЕМЕ  
С ПЕРЕМЕННОЙ НАГРУЗКОЙ ..... 48

Белокопытов А. Р., Гуляев А. В., Березнев А. М., Тен Е. Е., Фокин Д. С.

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИЯ ПОВЫШАЮЩЕЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ЭКОСИСТЕМЫ INDUSTRIAL IOT ..... 58

Попова О. В., Григорьев Я. Ю., Жарикова Е. П., Григорьева А. Л.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ..... 68

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

Марьин С. Б., Щербатюк Г. А., Кириллин В. Д., Пак М. И.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДАЧИ СРЕДНЕЙ ЧАСТИ  
ТРУБНОЙ ЗАГОТОВКИ С ПОДПОРОМ ..... 73

Кравченко Е. Г., Отрякина Т. А., Шершнёв А. А.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ ..... 79

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Дзюба В. А., Погорельских И. В., Сайдамирова О. А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
С МУФТОВЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ АРМАТУРЫ ..... 88

Гринкруг Н. В., Меньшикова В. А.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ЛАНДШАФТНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ИХ ВЛИЯНИЕ  
НА АРХИТЕКТУРУ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ И СТРОИТЕЛЬСТВО..... 93

Сохацкая Д. Г., Зубкова К. С.

ЭКОЛОГИЯ КАК ОДИН ИЗ КРИТЕРИЕВ КОМФОРТНОСТИ ЖИЛОГО КВАРТАЛА ..... 99

Литвинова Н. В.

ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ КОМФОРТНОЙ СРЕДЫ В РАМКАХ  
МОБИЛЬНОЙ АДАПТАЦИИ ОБЩЕСТВЕННЫХ ПРОСТРАНСТВ  
(НА ПРИМЕРАХ МИРОВОЙ ПРАКТИКИ)..... 104

## НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

ПОСВЯЩАЕТСЯ СВЕТОЙ ПАМЯТИ ВЫДАЮЩЕГОСЯ УЧЁНОГО

И ИЗОБРЕТАТЕЛЯ БОРИСА НИКОЛАЕВИЧА МАРЬИНА ..... 114

УЧЁНЫЕ ЗАПИСКИ КНАГТУ: НАУКИ О ПРИРОДЕ И ТЕХНИКЕ 2021..... 116

Учёные записки КНАГТУ  
2021 № VII (55)  
Науки о природе и технике

Выпускающий редактор  
С. Н. Иванов

Подписано в печать 24.12.2021  
Дата выхода в свет 29.12.2021

Формат А4.  
Бумага офисная 80 г/м<sup>2</sup>.  
Усл. печ. л. 13,63.  
Уч.-изд. л. 17,18.  
Тираж 200. Заказ 30465.

Отпечатано в типографии  
КНАГУ  
681013,  
г. Комсомольск-на-Амуре,  
пр. Ленина, д. 27.



