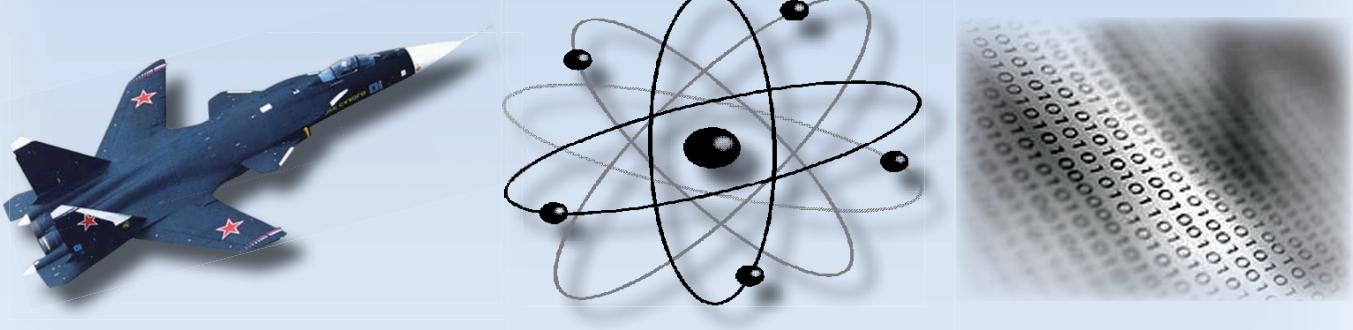


# Учёные записки

ISSN 2076-4359  
№ III (67)  
2023

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 = Ученые записки Komsomol'skogo-na-Amure gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta

Уважаемые авторы, пожалуйста, присылайте свои материалы на адрес электронной почты: journal@knastu.ru

Правила оформления материалов размещены на странице журнала «Учёные записки КнАГТУ», 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:   | Алексей Иванович Евстигнеев, доктор технических наук, профессор. E-mail: diss@knastu.ru         |
| Заместитель главного редактора журнала:                             | Александр Витальевич Космынин, доктор технических наук, профессор. E-mail: avkoms@knastu.ru     |
| Выпускающий редактор серии «Науки о природе и технике»:             | Сергей Николаевич Иванов, доктор технических наук, доцент. E-mail: snivanov57@mail.ru           |
| Выпускающий редактор серии «Науки о человеке, обществе и культуре»: | Галина Алексеевна Шушарина, кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru         |
| Литературный редактор:  | Александр Альфредович Шунейко, доктор филологических наук, доцент. E-mail: a-shuneyko@yandex.ru |
| Технический редактор:   | Татьяна Николаевна Карпова E-mail: karpovat@list.ru   |
| Перевод на английский язык:   | Галина Алексеевна Шушарина, кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru         |
| Дизайн и верстка:   | Оксана Вадимовна Приходченко, кандидат технических наук. E-mail: cik@knastu.ru                  |
| Менеджер информационных ресурсов:                                   | Иван Константинович Андрианов, кандидат технических наук. E-mail: ivan_andrianov_90@mail.ru     |

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

|  |  |
|--|--|
| Ответственный секретарь серии «Науки о природе и технике»  | Сергей Николаевич Иванов, доктор технических наук, доцент. E-mail: snivanov57@mail.ru  |
| <b>Отделы:</b>   |  |
| 1. Авиационная и ракетно-космическая техника (2.5.13 - Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов) | Сергей Иванович Феоктистов, доктор технических наук, профессор. E-mail: ssf@knastu.ru  |
| 2. Энергетика (2.4.2<br>- Электротехнические комплексы и системы)  | Константин Константинович Ким, доктор технических наук, профессор. E-mail: kimkk@inbox.ru<br>Александр Владимирович Сериков, доктор технических наук, профессор. E-mail: em@knastu.ru<br>Сергей Николаевич Иванов, доктор технических наук, доцент. E-mail: snivanov57@mail.ru |
| 3. Управление (2.3.3 - Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами)                          | Вячеслав Алексеевич Соловьев, доктор технических наук, профессор. E-mail: keraru@knastu.ru<br>Андрей Юрьевич Торгашов, доктор технических наук, доцент. E-mail: torgashov@iacp.dvo.ru  |
| 4. Вычислительная техника и информатика (1.2.2 - Математическое моделирование, численные методы комплексов программ)     | Константин Сергеевич Боромтин, доктор физико-математических наук, доцент. E-mail: as@knastu.ru<br>Анатолий Александрович Буренин, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН. E-mail: burenin@iacp.dvo.ru  |
| 5. Машиностроение (2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки)                        | Борис Яковлевич Мокрицкий, доктор технических наук, доцент. E-mail: boris@knastu.ru<br>Владимир Сергеевич Щетинин, доктор технических наук, доцент. E-mail: schetynin@mail.ru  |
| 6. Металлургия и металловедение (2.6.3 - Литейное производство)  | Эдуард Анатольевич Дмитриев, доктор технических наук, доцент. E-mail: rector@knastu.ru<br>Олег Викторович Башков, доктор технических наук, доцент, E-mail: bashkov_ov@mail.ru  |
| 7. Математика и механика (01.01.00; 01.02.00)  | Анатолий Александрович Буренин, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН. E-mail: burenin@iacp.dvo.ru  |
| 8. Флот и кораблестроение (05.08.00; 05.22.00)   | Николай Алексеевич Тарануха, доктор технических наук, профессор. E-mail: taranukha@knastu.ru   |
| 9. Науки о земле и безопасности жизнедеятельности человека (05.26.00; 25.00.00)  | Ольга Григорьевна Шакирова, доктор химических наук, доцент, E-mail: hiht@knastu.ru   |
| 10. Строительство и архитектура (05.23.00)   | Николай Петрович Крадин, доктор архитектуры, профессор, член-корреспондент РААСХ. E-mail: n_kradin@mail.ru   |

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

|  |   |
|--|---|
| Ответственный секретарь серии «Науки о человеке, обществе и культуре»        | Галина Алексеевна Шушарина, кандидат филологических наук, доцент. E-mail: lmk@knastu.ru   |
| <b>Отделы:</b>   |   |
| 1. Философия, социология и культурология (5.4.6; 5.7.8; 5.10.1)              | Яна Станиславовна Крыжановская, доктор культурологии, доцент. E-mail: krijanowskaia.yana2012@yandex.ru<br>Евгения Валерьевна Савелова, доктор философских наук, кандидат культурологии, доцент. |
| 2. Филология и искусствознание (5.9.5; 5.9.8)                                | Виктория Юрьевна Прокофьева, доктор филологических наук, профессор. Илья Игоревич Докучаев, доктор философских наук, профессор.   |
| 3. Психология и педагогика (5.8.1; 5.8.2; 5.8.7)                             | Олег Александрович Бузев, доктор филологических наук, профессор. E-mail: buz07@list.ru  |
| 4. История (5.6.1; 5.6.2)  | Татьяна Евгеньевна Наливайко, доктор педагогических наук, профессор. E-mail: tenal@knastu.ru  |
| 5. Экономика (5.2.1; 5.2.3; 5.2.6)   | Жанна Валерьевна Петрунина, доктор исторических наук, доцент. E-mail: petrunina71@bk.ru, history@knastu.ru  |
| <b>Периодичность: два раза в квартал (один номер каждой серии в квартал)</b> |   |

**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 Шенъянского аэрокосмического университета (КНР)

**ЭНЕРГЕТИКА**

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

ИШТВАН ВАЙДА, доктор технических наук, профессор, директор Института автоматики 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 КУЛЬЧИН, академик РАН, доктор физико-математических наук, директор Института автоматики и процессов управления ДВО РАН

ТАКАО ИТО, доктор технических наук, профессор факультета бизнес-управления Университета Милякизи (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 автоматики 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 metallurgии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН

**ФЛОТ И КОРАБЛЕСТРОЕНИЕ**

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

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕНДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

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 Шенъянского 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

ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ СЕРДЮКОВ, доктор философских наук, профессор, профессор кафедры философии, социологии и права Дальневосточного государственного университета путей сообщения

**ФИЛОЛОГИЯ И ИСКУССТВОЗНАНИЕ**

СВЕТЛНА 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

**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

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА  
AVIATION, ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

**Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.**  
**G. A. Kolykhalov, E. G. Kravchenko**

**ВЛИЯНИЕ ТЁМНОЙ МАТЕРИИ НА ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ  
С ПОЗИЦИИ МОДЕЛИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ**

**DARK MATTER INFLUENCE ON THE TRAJECTORIES OF COSMIC BODIES FROM  
SOLID MODEL POSITION**

**Колыхалов Геннадий Антонович** – начальник научно-исследовательского отдела Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: kolykhalov40@mail.ru.

**Gennady A. Kolykhalov** – Head of Research Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: kolykhalov40@mail.ru.

**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.

**Аннотация.** Рассмотрено влияние тёмной материи на траекторию движения планеты Земля. Принято, что тёмная материя является сплошной средой, континуумом, обладающим динамической вязкостью. Получен критерий, характеризующий устойчивость планеты при её движении по орбите. Приведены простейшие расчёты, определяющие некоторые временные характеристики жизни планеты.

**Summary.** The influence of dark matter on the trajectory of the planet Earth is considered. It is accepted that dark matter is a continuous medium, a continuum with dynamic viscosity. A criterion was obtained characterizing the stability of the planet during its movement in orbit. The simplest calculations are given that determine some time characteristics of the life of the planet.

**Ключевые слова:** тёмная материя, континуум, вязкость, конвекция, сопротивление, планета, гравитация, траектория, устойчивость.

**Key words:** dark matter, continuum, viscosity, convection, resistance, planet, gravitation, trajectory, stability.

УДК 53.091:532.5.013.4

В настоящее время существует гипотеза, что видимая нами Вселенная не является пустой, а вся заполнена материй с чрезвычайно малой плотностью. Её существование удаётся обнаружить только в рамках её гравитационного взаимодействия с видимой материй [1].

Предполагается, что тёмная материя (ТМ) состоит из частиц-атомов, которые, как и в газах, находятся в хаотичном движении и могут рассматриваться как континуум (сплошная среда). Гипотетически представляется интересным оценить влияние тёмной материи на траектории движения планет Солнечной системы, в частности Земли. Приняв, что тёмная материя представляет собой сплошную среду, будем полагать, что динамическая вязкость среды не равна нулю:  $\mu_e \neq 0$ . В этом случае необходимо принимать во внимание действие силы сопротивления при движении планеты по траектории и естественно-конвективного трения в радиальном направлении.

То, что известно о тёмной материи, не позволяет надёжно определить величину средней длины свободного пробега в ней частицы-атома, что является критерием сплошности среды. Положим её значение самой большой из возможных величин, при которой ещё можно считать тёмную материю как сплошную среду.

В газовой динамике известен критерий подобия Кнудсена ( $Kn$ ), который характеризует степень разреженности газового потока [2]:

$$Kn = \frac{l}{L}, \quad (1)$$

где  $l$  – средняя длина свободного пробега частиц-атомов тёмной материи;  $L$  – характерный размер обтекаемого тела, в нашем случае диаметр Земли, то есть  $L = 12,74 \cdot 10^6$  м.

Известно [2], что при числах Кнудсена порядка  $Kn \sim 10^{-3}$  и ниже справедливы основные уравнения гидромеханики сплошной среды: уравнения Эйлера, Навье-Стокса, энергии.

Приняв, что верхняя граница числа  $Kn = 10^{-3}$ , определим, какой должна быть предельная длина свободного пробега частиц-атомов тёмной материи, при которой тёмную материю можно интерпретировать как сплошную среду. Тогда из уравнения (1) следует

$$l = Kn \cdot L = 10^{-3} \cdot 12,74 \cdot 10^6 = 1,274 \cdot 10^4 \text{ м.}$$

Для упрощения расчётов округлим это значение до величины  $l = 10^4$  м. В рамках принятого предположения о тёмной материи как сплошной среде определим коэффициент кинематической вязкости  $\nu_e, \left(\frac{\text{м}^2}{\text{с}}\right)$  [3]:

$$\nu_e = \frac{\mu_e}{\rho_e} = \frac{1}{3} \cdot V_e \cdot l,$$

где  $\mu_e$  – коэффициент динамической вязкости;  $\rho_e$  – плотность газа тёмной материи;  $V_e$  – средняя скорость теплового движения частиц тёмной материи.

Из последнего соотношения следует, что число  $Re$  будет равно

$$Re = \frac{V_e \cdot l}{\nu_e} = 3, \quad (2)$$

где  $V_e$  равно скорости света С в вакууме, т. е.  $V_e = C = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ .

Тогда из формулы (2) получим

$$\nu_e = \frac{1}{3} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 10^4 = 10^{12} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}. \quad (3)$$

С целью оценки воздействия тёмной материи на траекторию движения планеты Земля вокруг Солнца воспользуемся соотношениями, полученными в работах [4–6] для силы трения  $W_{e-k}$  и коэффициента трения  $C_{fe-k}$  в условиях естественной конвекции (Е-К) и силы сопротивления  $W_{b-k}$  и коэффициента сопротивления  $C_{fb-k}$  для условий вынужденной конвекции (В-К).

В общем виде сила трения  $W$  определяется по формуле

$$W = C_f \cdot \frac{\rho_e \cdot V^2}{2} \cdot \pi r_0^2,$$

где  $V = V^* = [2r_0 \cdot g_3 \cdot \beta_t \cdot (T_w - T_\infty)]^{0,5}$  – значение скорости в режиме Е-К;  $V = V_3$  – скорость в режиме В-К;  $C_f$  – коэффициент сопротивления (трения);  $r_0$  – радиус Земли;  $g_3$  – ускорение свободного падения на Землю;  $\beta_t$  – коэффициент температурного расширения газа (тёмной материи).

Соответственно, введём обозначения:

1.  $C_f = C_{fe-k}$  – коэффициент сопротивления при вынужденной конвекции;
2.  $C_f = C_{fb-k}$  – коэффициент естественно-конвективного трения;
3.  $W = W_{e-k}$  – сила трения при Е-К;
4.  $W = W_{b-k}$  – сила сопротивления при В-К.

Будем полагать, что возможное перемещение планеты в радиальном направлении Солнце-Земля под воздействием тёмной материи определяется силой трения. Перемещение происходит за счёт естественной конвекции благодаря разности температур между поверхностью планеты и

окружающим планету пространством под воздействием гравитационного притяжения Земли Солнцем.

Сила сопротивления Земли  $W_{\text{в-к}}$  при её движении по траектории определяется скоростью движения относительно тёмной материи.

Для определения коэффициентов  $C_{f_{e-k}}$  и  $C_{f_{в-к}}$  предварительно подсчитаем критерии Грасгофа Gr и Рейнольдса Re.

Критерий Gr находится по формуле

$$Gr = \frac{(2r_0)^3 \cdot g_3 \cdot \beta_t \cdot (T_w - T_\infty)}{\nu_e^2}, \quad (4)$$

где  $T_w$  – температура поверхности Земли;  $T_\infty$  – температура материи Космоса, а критерий Re – по соотношению

$$Re = \frac{V_3 \cdot (2r_0)}{\nu_e}, \quad (5)$$

где  $V_3$  – скорость движения Земли по орбите вокруг Солнца.

Примем

$T_\infty = 2,75 \text{ K}$ ,

$T_w = 288 \text{ K}$  – это среднегодовая температура поверхности Земли за 2021 год,

$$\beta_t = \frac{1}{273 \text{ K}}, \quad g_3 \approx 10 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}. \quad (6)$$

Подставим значения параметров из зависимостей (1), (3) и (6) в формулу (4), получим

$$Gr = \frac{(12,8 \cdot 10^6)^3 \cdot 10 \cdot 0,364 \cdot 10^{-2} \cdot 285,25}{10^{24}} = 2,3 \cdot 10^{-2}.$$

Соответственно, число Re из формулы (5) будет иметь значение

$$Re = \frac{V_3 \cdot (2r_0)}{\nu_e} = \frac{3 \cdot 10^4 \cdot 12,8 \cdot 10^6}{10^{12}} = 0,384 < 1.$$

Так как оба критерия  $Gr \ll 1$  и  $Re < 1$  малы, для расчёта  $C_{f_{e-k}}$  и  $C_{f_{в-к}}$  можно использовать линеаризованные уравнения Навье-Стокса и энергии.

При числах  $Gr < 1$  значение  $C_{f_{e-k}}$  в работах [4–6] определяется из выражения

$$C_{f_{e-k}} = \frac{4}{3} \left( 1 + \frac{12}{Gr^{0,5}} \right). \quad (7)$$

Для малых чисел Re коэффициент сопротивления при обтекании сферы, как известно, имеет значение [7]

$$C_{f_{в-к}} = \frac{24}{Re}. \quad (8)$$

Для определения сил  $W_{e-k}$  и  $W_{в-к}$  в силу линейности уравнений, используемых при решении задач в случаях  $Gr < 1$  и  $Re < 1$  воспользуемся принципом суперпозиции, независимости обоих видов движения и определим силы сопротивления независимо друг от друга, тем более они действуют во взаимно перпендикулярных направлениях. Имеем

$$W_{e-k} = \frac{4}{3} \left( 1 + \frac{12}{Gr^{\frac{1}{2}}} \right) \cdot \rho_e \cdot \frac{[2r_0 \cdot g_3 \cdot \beta_t \cdot (T_w - T_\infty)]}{2} \cdot \pi r_0^2.$$

Умножая числитель и знаменатель правой части полученного выражения на  $\nu_e^2$  и используя формулы (4), (7) для определения Gr, путём несложных преобразований получим

$$W_{e-k} = \frac{\pi}{6} \cdot Gr \cdot \left( 1 + \frac{12}{Gr^{\frac{1}{2}}} \right) \cdot \rho_e \cdot v_e^2. \quad (9)$$

Соответственно, с учётом формул (5), (8)

$$W_{b-k} = \frac{24}{Re} \cdot \frac{\rho_e \cdot V_3^2}{2} \cdot \pi r_0^2 = 6\pi \cdot r_0 \cdot V_3 \cdot \rho_e \cdot v_e. \quad (10)$$

Величину  $\rho_e$  определим, используя соотношение (3):

$$v_e = \frac{\mu_e}{\rho_e} = 10^{12} \frac{m^2}{s}. \quad (11)$$

Так как величина вязкости  $\mu_e$  для тёмной материи неизвестна, то примем её равной вязкости самого лёгкого газа водорода при нормальных условиях [3]

$$\mu_* = 8,4 \cdot 10^{-6} \left( \frac{N \cdot s}{m^2} \right).$$

Реальная вязкость тёмной материи должна быть намного меньше. Соответственно,

$$\rho_e = \mu_e \cdot 10^{-12} = 8,4 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-12} = 8,4 \cdot 10^{-18} \left( \frac{kg}{m^3} \right).$$

$$\text{Приближённо примем } \rho_e \approx 10^{-17} \left( \frac{kg}{m^3} \right).$$

В работе [3] представлены характерные значения для плотности  $\rho_e$ : для межзвёздного вещества  $\rho_e = 10^{-20} \frac{kg}{m^3}$  и для межгалактического вещества  $\rho_e = 10^{-26} \frac{kg}{m^3}$ .

Тогда с учётом формулы (11), записанной в форме

$$\mu_e = 10^{12} \cdot \rho_e,$$

получим динамическую вязкость:

– для межзвёздного вещества

$$\mu_{e \text{ M-Z}} = 10^{12} \cdot 10^{-20} = 10^{-8} \frac{N}{m \cdot s},$$

– для межгалактического вещества

$$\mu_{e \text{ M-G}} = 10^{12} \cdot 10^{-26} = 10^{-14} \frac{N}{m \cdot s}.$$

При таких малых значениях динамической вязкости можно считать ТМ идеальной жидкостью и применять к ней все закономерности в рамках модели идеальной жидкости.

В первом приближении характерная плотность ТМ в Солнечной системе будет иметь значение

$$\rho_e = 8,4 \cdot 10^{-18} \left( \frac{kg}{m^3} \right) \approx 10^{-17} \left( \frac{kg}{m^3} \right). \quad (12)$$

Значение плотности из формулы (12) можно положить как характерное значение плотности для ТМ в Солнечной системе.

Подставим в формулы (9) и (10) значения величин, в них входящих, получим

$$W_{e-k} = \frac{3,14}{6} \cdot 2,3 \cdot \left( 1 + \frac{120}{2,3^{0,5}} \right) \cdot 10^{-17} \cdot 10^{24} = 10^7 N,$$

$$W_{b-k} = 6 \cdot 3,14 \cdot 6,4 \cdot 10^6 \cdot 3 \cdot 10^4 \cdot 10^{-17} \cdot 10^{12} N = 3,61 \cdot 10^7 N.$$

Величина ускорения от силы  $W_{e-k}$  равна

$$a_r = \frac{W_{e-k}}{m_3} = \frac{10^7}{6 \cdot 10^{24}} = 0,17 \cdot 10^{-17} \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Сравним это ускорение с гравитационным ускорением, создаваемым Солнцем у Земли  $g_c$ :

$$\frac{a_r}{g_c} = \frac{0,17 \cdot 10^{-17}}{6 \cdot 10^{-3}} = 0,03 \cdot 10^{-14}.$$

Эта малая доля, но она есть и направлена на удаление Земли от Солнца.

Кинетическая энергия планеты при движении по траектории определится выражением

$$A = \frac{m_3 \cdot V_3^2}{2} = \frac{6 \cdot 10^{24} \cdot 9 \cdot 10^8}{2} = 27 \cdot 10^{32} \text{ Дж},$$

где  $m_3$  – масса Земли;  $V_3$  – скорость движения Земли по орбите вокруг Солнца.

Мощность  $N$ , расходуемая планетой при своём движении по орбите, определяется формулой

$$N = W_{\text{в-к}} \cdot V_3.$$

Подставим численные значения величин, получим

$$N = 3,61 \cdot 10^7 \cdot 3 \cdot 10^4 = 10^{12} \frac{\text{Дж}}{\text{с}}.$$

Условное время израсходования всей кинетической энергии Земли при своём движении по орбите равно

$$t = \frac{A}{N} = \frac{27 \cdot 10^{32}}{10^{12}} = 2,7 \cdot 10^{21} \text{ с}.$$

В годах это составит около ста тысяч миллиардов лет.

С момента Большого взрыва прошло около 14 миллиардов лет. По меркам Космоса срок очень мал. В простейшем варианте теории Великого объединения оценка времени жизни протона даёт значение  $\sim 10^{31}$  лет. Нижний предел времени жизни протона оценивается около  $6,5 \cdot 10^{31}$  лет [10]. Поэтому должен существовать другой источник, восполняющий эту потерю мощности и создающий силу, равную силе сопротивления  $W_{\text{в-к}}$ . На эту роль может претендовать ТМ.

Некоторые учёные полагают, что космические тела, в том числе и наша Земля, являются стоком для тёмной материи. Она радиально проникает в центр нашей планеты и увеличивает её массу, переходя в фазу видимой [1].

Определим величину входящей массы за единицу времени, используя соотношение для постоянства расхода через поверхность Земли в виде

$$\frac{dm_e}{dt} = \rho_e \cdot V_* \cdot S_{\text{п}} = \text{const}, \quad (13)$$

где  $S_{\text{п}} = 4\pi \cdot r_0^2$  – площадь поверхности планеты Земля;  $V_*$  – скорость радиального вхождения в центр планеты тёмной материи, требует определения;  $m_e$  – масса тёмной материи.

Как известно, закон изменения количества движения при изменяющейся массе и постоянстве скорости определится выражением

$$F_p = \frac{dm_e}{dt} \cdot V_3,$$

где  $F_p$  – «реактивная» сила, возникающая за счёт притока масс тёмной материи в центр Земли.

В нашем случае она действует в направлении движения планеты по касательной к траектории и определится выражением

$$F_p = \rho_e \cdot V_* \cdot S_p \cdot V_3. \quad (14)$$

Определим отношение сил

$$K = \frac{W_{\text{в-к}}}{F_p}. \quad (15)$$

Подставим в зависимость (15) выражения величин из формул (10) и (14), получим

$$K = \frac{6\pi \cdot r_0 \cdot V_3 \cdot \rho_e \cdot v_e}{\rho_e \cdot V_* \cdot 4\pi \cdot r_0^2 \cdot V_3} = \frac{3v_e}{2V_e \cdot r_0}.$$

Условием устойчивого движения планеты по орбите является равенство сил сопротивления и «реактивной» силы, т. е. коэффициент  $K = 1$  и, соответственно,

$$Re_* = \frac{V_* \cdot 2r_0}{v_e} = 3. \quad (16)$$

Отсюда

$$V_* = \frac{3v_e}{2r_0}.$$

Подставим значения, получим

$$V_* = \frac{3 \cdot 10^{12}}{2 \cdot 6,4 \cdot 10^6} = 0,234 \cdot 10^6 \text{ (м/с)}.$$

Эта скорость составляет приблизительно около 0,08 % от скорости света.

В качестве примера рассмотрим приток тёмной материи в центр планеты за  $10^{10}$  лет (девять миллиардов лет).

Воспользуемся выражением (13) для определения расхода:

$$\frac{dm_e}{dt} = \rho_e \cdot V_* \cdot S_{\pi}$$

и запишем его в форме

$$\Delta m = \rho_e \cdot V_* \cdot S_{\pi} \cdot \Delta t.$$

Учитывая, что в году  $3,2 \cdot 10^7$  с, то  $\Delta t = 3,2 \cdot 10^{17}$  с.

Тогда после подстановки всех значений получим приближённо  $\Delta m = 4 \cdot 10^{20}$  кг.

Масса Земли  $6,4 \cdot 10^{24}$  кг.

Доля притока массы тёмной материи по отношению к массе Земли за этот период составляет

$$\frac{4 \cdot 10^{20}}{6,4 \cdot 10^{24}} = 0,625 \cdot 10^{-4} = 0,00625 \text{ %}.$$

Равенство критериев  $Re$  и  $Re_*$  по формулам (2) и (16) указывает на тот интересный факт, что оно носит универсальный характер критерия  $Re$ , как для обычных газовых потоков, так и для тёмной материи.

Равенство критерия  $Re_* = 3$  определяет устойчивость движения по орбите. В этом случае силы, действующие на планету, взаимно уравновешены. Увеличение критерия  $Re_* > 3$  определяет рост «реактивной силы», и, соответственно, обеспечивается переход планеты на более высокую орбиту за счёт более высокой скорости по орбите и, соответственно, снижения  $g_c$  и увеличения  $a_r$ , т. е. нарушается устойчивость движения, при этом следует отметить, что естественная конвекция способствует в этом случае увеличению неустойчивости, т. к. она всегда направлена по радиусу Солнце-Земля вовне. При этом с ростом радиуса орбиты Земли падает сила притяжения Земли к Солнцу, т. е. убывают  $g_c$  и перепад температур ( $T_w - T_\infty$ ), и в конечном итоге эта сила стремится к нулю, но при этом эта сила при  $Re_* > 3$  является возмущающей силой.

Уменьшение  $Re_* < 3$  приводит к переходу планеты на более низкую орбиту, при этом увеличивается  $g_c$ , т. е. возникает тенденция к дальнейшему уменьшению радиуса орбиты, однако при этом сила  $W_{e-k}$  уже может тормозить снижение орбиты по радиусу, т. е. играет роль демпфиру-



ющей силы. Причём по мере уменьшения радиуса орбиты планеты она растёт за счёт роста  $g_c$  и роста перепада температур ( $T_w - T_\infty$ ). Таким образом, при уменьшении  $Re_* < 3$  сила естественно-конвективного трения играет в определённой мере роль демпфирующей силы.

Сила трения при Е-К в общем случае является радиально неуравновешенной, и остаётся возможность уравновешивания этой силы, возникающей за счёт тёмной материи – это увеличить силу притяжения планеты за счёт уменьшения радиуса орбиты, и соответственно, увеличения силы тяготения планеты к Солнцу. Рассмотрим в этом ракурсе решение поставленной задачи.

Определим возможное изменение радиуса орбиты за счёт влияния естественной конвекции, для чего воспользуемся соотношениями

$$g_c = \frac{V_3^2}{r_1} \text{ и } (g_c + a_r) = \frac{V_3^2}{(r_1 - \Delta r)},$$

где  $r_1$  – расстояние от Земли до Солнца.

При этом принимаем, что скорость движения планеты при смене орбиты не изменяется. Объединяя обе формулы, получим соотношение для определения  $\Delta r$ :

$$\Delta r = r_1 \cdot \frac{a_r}{(g_c + a_r)} \approx r_1 \cdot \frac{a_r}{g_c} = 1,5 \cdot 10^{11} \cdot \frac{0,17 \cdot 10^{-17}}{6,3 \cdot 10^{-3}} \text{ м.}$$

Подставим значения входящих величин, приближённо получим

$$\Delta r \approx 4,25 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Смещение орбиты от влияния естественной конвекции практически отсутствует.

Что касается жидкости и газа, то равенство критерия  $Re = 3$ , вытекающее из формулы (2), определяет устойчивость ламинарного движения газа или жидкости (будем их объединять общим названием – жидкость).

Как известно [8], критерий  $Re$  определяет отношение инерциальных (живых) сил к силам трения. Превалирование сил инерции над силами трения и их рост ведут к неустойчивости слоистого движения жидкости, что приводит к появлению поперечных основному движению пульсаций, т. е. происходит беспорядочное перемешивание жидкости в направлении, перпендикулярном основному направлению движения – поток турбулизируется.

Как отмечается в работе [9], свойство устойчивости представляет собой характеристику движения жидкости в целом, и поэтому это свойство определяется числом Рейнольдса.

Граница устойчивости ламинарного движения характеризуется некоторым значением числа Рейнольдса, которое называется критическим  $Re_{kp}$ , когда ламинарный режим переходит в турбулентный. Для сферы оно имеет порядок  $Re \sim 10^3$ .

Критерий  $Re = 3$  указывает на то, что начало формирования неустойчивости в движении потока около сферы происходит именно при этом числе. Экспериментальные и теоретические исследования показывают [9], что изменение коэффициента сопротивления при вынужденной конвекции  $C_{f_{B-K}}$  до  $Re = 3$  носит линейный характер, но начиная с  $Re > 3$  и далее происходит заметно плавное изменение характера этого графика, и при числах  $Re$ , близких к  $Re \sim 10^3$ , наступает кризис режима течения и он становится турбулентным, практически автомодельным, т. е. не зависящим от  $Re$ .

Таким образом,  $Re = 3$  определяет границу устойчивости. До  $Re = 3$  преобладает влияние сил трения и все возникающие колебания гасятся, т. е. течение устойчиво. При  $Re > 3$  и выше начинает формироваться неустойчивость, в этом случае силы инерции начинают преобладать над силами трения.

Таким образом, критерий  $Re = Re_* = 3$  является как бы безразмерным критерием, мировой константой устойчивости при движении сферических тел в газовой среде на уровне как микрокосмоса, так и макрокосмоса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Burago, S. G. Gravity, dark matter and dark energy balance. The General Science Journal. Astrophysics. 2014. April. P. 20.
2. Физическая энциклопедия. Т. 2. Добротность-магнитооптика / под общ. ред. А. А. Прохорова. – М.: Советская энциклопедия, 1990. – 703 с.
3. Физическая энциклопедия. Т. 1. Ааронова-Бома эффект – Длинные линии / под общ. ред. А. А. Прохорова. – М.: Советская энциклопедия, 1988. – 704 с.
4. Колыхалов, Г. А. Сопротивление сферы при смешанной конвекции в области чисел  $Re < 1$  и  $Gr < 1$  / Г. А. Колыхалов, Д. Г. Колыхалов // Вестник Комсомольского-на-Амуре гос. техн. ун-та. Вып. 2. Сб. 1. Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т, 2000. – Ч. 3.
5. Колыхалов, Г. А. Теплообмен и трение нагретой сферы в условиях свободной конвекции / Г. А. Колыхалов, Л. И. Кудряшёв // Самолётостроение и авиационная техника: межвузовский сборник научных трудов. – Хабаровск, 1976. – С. 49-55.
6. Колыхалов, Г. А. Экспериментальное исследование естественно-конвективного трения около сферы / Г. А. Колыхалов, В. Т. Череповский // Самолётостроение и авиационная техника: межвузовский сборник научных трудов. – Хабаровск, 1977. – С. 59-62.
7. Хаппель, Дж. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса / Дж. Хаппель, Г. Бреннер; пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 630 с.
8. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1970. – 823 с.
9. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1967. – 428 с.
10. Джанколи, Д. Физика. В 2 т. Т. 2. / Д. Джанколи; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 607 с.

# ЭНЕРГЕТИКА ENERGETICS

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

## **О НЕУСТОЙЧИВОСТИ ОБРАЗОВАНИЙ ИЗ СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЫ В МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ**

### **ON THE INSTABILITY OF FORMATIONS FROM WEAKLY IONIZED PLASMA IN MAGNETOHYDRODYNAMIC DEVICES**

**Ким Константин Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретические основы электротехники» Ленинградского института инженеров железнодорожного транспорта (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, 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. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Ким Константин Константинович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электротехника и теплоэнергетика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (Россия, Санкт-Петербург); Россия, 190031, Московский пр., д. 9. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Konstantin K. Kim** – Dr. Sc., Professor, Head of Electrical and Thermal Power Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Av., Sankt-Petersburg, Russia. E-mail: kimkk@inbox.ru.

**Иванов Сергей Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Электромеханика» 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 Engineering, Professor, Electromechanics 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.** Для ускорения плазменных потоков в магнитогидродинамических (МГД) устройствах можно использовать кинетическую энергию нейтрального газа. Для этого в рабочем канале устройства создаётся периодическая структура из чередующихся ускоряемых плазменных слоёв и ускоряющих слоёв нейтрального газа, инжектируемых с большой скоростью в канал и выполняющих роль своеобразных «поршней» для плазменных слоёв. Однако движение плазменных слоёв в условиях воздействия на них комбинации различно ориентированных электрических и магнитных полей характеризуется неустойчивостью плазменных образований, что неблагоприятно влияет на рабочие характеристики МГД-устройства. В этих устройствах внешнее электрическое поле и градиент концентрации заряженных частиц ортогональны друг другу. Разница в скоростях дрейфа электронов и ионов является причиной возникновения неоднородности концентрации заряженных частиц, которая приводит к неустойчивости неоднородной слабоионизованной плазмы. В представленной работе исследуется неустойчивость образований из слабоионизованной плазмы (слоёв) в ортогональных электрических и магнитных полях, когда неоднородность концентрации заряженных частиц наблюдается в направлении, перпендикулярном к внешнему электрическому полю.

**Summary.** To accelerate plasma flows in magnetohydrodynamic (MHD) devices, it is possible to use the kinetic energy of a neutral gas. To do this, a periodic structure is created in the working channel of the device from alternating accelerated plasma layers and accelerating layers of neutral gas injected at high speed into the channel and acting as a kind of «pistons» for plasma layers. However, the movement of plasma layers under the influence of a combination of differently oriented electric and magnetic fields on them is characterized by instability of plasma formations, which adversely affects the performance characteristics of the MHD device. In these devices, the external electric field and the concentration gradient of charged particles are orthogonal to each other. The difference in the drift velocities of electrons and ions is the cause of the inhomogeneity of the concentration of charged particles, which leads to instability of the inhomogeneous weakly ionized plasma. In this paper, the instability of formations from weakly ionized plasma (layers) in orthogonal electric and magnetic fields is investigated when the inhomogeneity of the concentration of charged particles is observed in the direction perpendicular to the external electric field.

Ким К. И., Ким К. К., Иванов С. Н.

О НЕУСТОЙЧИВОСТИ ОБРАЗОВАНИЙ ИЗ СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЫ  
В МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

**Ключевые слова:** неустойчивость, слабоионизованная плазма, дрейф, электрическое поле, магнитное поле.

**Key words:** instability, weakly ionized plasma, drift, electric field, magnetic field.

УДК 537.5

**Введение.** Среди известных методов ускорения плазменных потоков в МГД-устройствах использование для этой цели кинетической энергии нейтрального газа занимает особое место. В этом случае в рабочем канале устройства создаётся периодическая структура из чередующихся ускоряемых плазменных слоёв и ускоряющих слоёв нейтрального газа, инжектируемых с большой скоростью в канал и выполняющих роль своеобразных «поршней» для плазменных слоёв [1–4]. Однако ускорение таким образом плазменных слоёв в условиях воздействия на последние комбинации различно ориентированных электрических и магнитных полей характеризуется неустойчивостью плазменных образований, что неблагоприятно сказывается на рабочих характеристиках МГД-устройства. В этих устройствах внешнее электрическое поле и градиент концентрации заряженных частиц ортогональны друг другу.

В представленной работе исследуется неустойчивость образований из слабоионизованной плазмы (слоёв) в ортогональных электрических и магнитных полях при неоднородности концентрации заряженных частиц в направлении, перпендикулярном к внешнему электрическому полю.

**Постановка задачи.** Допустим, что неоднородность плазмы существует вдоль оси  $x$ , а внешние электрическое и магнитное поля однородны и ориентированы: первое по оси  $y$ , а второе по оси  $z$ . Считаем, что толщина плазменного слоя равна  $2a$  (по оси  $x$ ), а размеры слоя вдоль осей  $y$  и  $z$  достаточно велики, поэтому граничные условия по этим направлениям можно не учитывать.

Ограничимся исследованиями колебаний с частотой, значительно меньше ленгмюровской. Также будем считать толщину плазменного слоя значительно больше длины Дебая. Поэтому плазму можно считать квазинейтральной. Пренебрегая рекомбинацией, можно записать уравнение сохранения зарядов следующим образом:

$$\partial v / \partial \tau + \nabla n v_e = Zn; \quad \partial v / \partial \tau + \nabla n v_i = Zn, \quad (1)$$

где  $n$  – концентрация;  $v_e$  и  $v_i$  – вектора скоростей электронов и ионов;  $Z$  – частота ионизации.

Для определения скоростей  $v_e$  и  $v_i$  необходимо использовать уравнения движения частиц. При максвелловском распределении частиц по скоростям и постоянных электронной  $T_e$  и ионной  $T_i$  температурах (термодиффузия не учитывается) процесс переноса носит диффузный характер, т. к. направленная скорость частиц много меньше тепловой. Если не учитывать индуцированное магнитное поле из-за низкой концентрации заряженных частиц, электрическое поле потенциально. Частота столкновений ионов с нейтральными атомами  $v_{in}$  намного больше циклотронной частоты ионов  $\omega_i$ , частота возмущения  $\omega$  и частота столкновений заряженных частиц  $v_{ei}$  ( $v_{ie}$ ) малы, по сравнению с частотой столкновения с нейтральными атомами  $v_{en}$ ,  $v_{in}$ . Учитывая отмеченное, выражения (1) можем записать в виде

$$ne\nabla\psi - ne[v_e \mathbf{B}] - T_e \nabla n - nm v_{en} v_e = 0, \quad ne\nabla\psi + T_i \nabla n - nM v_{in} v_i = 0, \quad (2)$$

где  $m$  и  $M$  – массы электрона и иона соответственно.

Из (2) получаем выражения для направленных скоростей частиц (использована тензорная запись суммы одночленов с повторяющимися индексами):

$$v_{exi} = \beta_{xixj} \left( b_e \frac{\partial \psi}{\partial x_j} - \frac{D_e}{n} \frac{\partial n}{\partial x_j} \right); \quad (x_i = x, y, z; x_j = x, y, z);$$
$$v_i = -\beta_i \nabla \psi - \frac{D_i}{n} \nabla n; \quad \left( b_e = \frac{|e|\tau_e}{m_e}; b_i = \frac{|e|\tau_i}{M}; D_e = \frac{T_e \tau_e}{m_e}; D_i = \frac{T_i \tau_i}{M} \right),$$

где  $\tau_e$ ,  $\tau_i$  – средние времена между столкновениями электронов и ионов с другими частицами соответственно;  $b_e$  и  $b_i$  – подвижности электронов и ионов соответственно;  $D_e$  и  $D_i$  – коэффициенты диффузий электронов и ионов соответственно.

$$\begin{aligned}\beta_{xx} &= \beta \left[ 1 + (\omega_e \tau_e)^2 \right]^{-1}; & \beta_{xy} &= -(\omega_e \tau_e) \beta; & \beta_{xz} &= 0; \\ \beta_{yx} &= (\omega_e \tau_e) \beta; & \beta_{yy} &= \beta; & \beta_{yz} &= 0; \\ \beta_{zx} &= 0; & \beta_{zy} &= 0; & \beta_{zz} &= 1,\end{aligned}$$

здесь  $\omega_e$  – циклотронная частота электронов.

Из-за больших размеров плазменного слоя (по осям  $y$  и  $z$ ) возмущения концентрации и электрического поля можно представить в виде  $f(x) \exp i(k_y y + k_z z - \omega t)$ . Тогда при линеаризации уравнений (1) полагаем

$$\begin{aligned}n &= n_0(x) + n_1(x) \exp i(k_y y + k_z z - \omega t); \\ \psi &= \psi_0(x, y) + \psi_1(x) \exp i(k_y y + k_z z - \omega t); \\ \psi_0(x, y) &= \psi_0(x) + \psi_0(y); \quad \partial \psi_0 / \partial y = -E_0 = \text{const},\end{aligned}\tag{3}$$

где  $E_0$  – внешнее электрическое поле.

С учётом (3) из (1) получим уравнение непрерывности для исходного состояния слабоионизованной плазмы:

$$\beta \left[ b_e \frac{d}{dx} \left( n_0 \frac{d\psi_0}{dx} \right) - D_e \frac{d^2 n_0}{dx^2} \right] + (\omega_e \tau_e) \beta b_e E_0 \frac{dn_0}{dx} = Z n_0, \quad -b_i \frac{d}{dx} \left( n_0 \frac{d\psi_0}{dx} \right) - D_i \frac{d^2 n_0}{dx^2} = Z n_0 \tag{4}$$

и уравнение сохранения зарядов в возмущениях ( $n_1$  и  $\psi_1$ ):

$$\begin{aligned}-(Z + i\omega) n_1 + \beta \frac{d}{dx} \left[ b_e \left( n_0 \frac{d\psi_1}{dx} + \frac{d\psi_0}{dx} n_1 \right) - D_e \frac{dn_1}{dx} \right] + (\omega_e \tau_e) \beta b_e \left[ E_0 \frac{dn_1}{dx} + i k_y \left( \frac{d\psi_0}{dx} n_1 - \frac{dn_0}{dx} \psi_1 \right) \right] - \\ -\beta \left[ k_y^2 (b_e n_0 \psi_1 - D_e n_1) + i k_y b_e E_0 n_1 \right] - k_z^2 (b_e n_0 \psi_1 - D_e n_1) = 0;\end{aligned}\tag{5}$$

$$-(Z + i\omega) n_1 - b_i \frac{d}{dx} \left( n_0 \frac{d\psi_1}{dx} + \frac{d\psi_0}{dx} n_1 \right) + k^2 (b_i n_0 \psi_1 + D_i n_1) + i k_y b_i E_0 n_1 - D_i \frac{d^2 n_1}{dx^2} = 0,$$

где  $k^2 = k_y^2 + k_z^2$ .

В зависимости от граничных условий возможны различные исходные состояния (4). Если допустить, что на границах плазменного слоя происходит полная нейтрализация заряженных частиц ( $n_0 = 0$  при  $x = \pm a$ ). Следствием этого предположения является сингулярность индуцированного электрического поля на границах плазменного слоя ( $x = \pm a$ ).

Имеем

$$n_0 = N_0 e^{\rho x} \cos vx; \quad v = 0,5\pi/a; \tag{6}$$

$$\frac{d\psi_0}{dx} = - \left( D_i + \frac{Z}{\rho^2 + v^2} \right) \frac{\rho}{b_i} + \left( D_i - \frac{Z}{\rho^2 + v^2} \right) \frac{v}{b_i} \operatorname{tg} vx; \tag{7}$$

$$\rho = \frac{\omega_e \tau_e}{2} \frac{b_i}{D_a} E_0; \quad Z = \frac{\beta b_e}{\beta b_e + b_i} D_a (\rho^2 + v^2); \quad D_a = \frac{1}{b_e} (b_i D_e + b_e D_i),$$

где  $D_a$  – коэффициент амбиполярной диффузии.

В отношении параметра  $\cos vx$ , входящего в уравнения (5), ставится задача о собственных значениях. При существовании собственного числа с  $\alpha < 0$  исходное состояние, определяемое соотношениями (6) и (7), можно считать неустойчивым, в противном случае – устойчивым. Чтобы решить данную задачу, необходимо определить возмущения  $n_1$  и  $\psi_1$ , но уравнения (5) точно решить невозможно, т. к. входящие в них коэффициенты являются переменными величинами. Для решения подходит метод Галеркина. Ограничимся нахождением приближения для первого собственного числа, для этого возьмём первую из последовательности координатных функций, удовлетворяющих условиям полноты.

Применим граничные условия  $n_1 = \psi_1 = 0$  при  $x = \pm a$  к возмущениям  $n_1$  и  $\psi_1$  и возьмём в качестве координатной функции  $\cos vx$ , т. е. положим

$$n_1 = N_1 \cos vx; \quad \psi_1 = \Psi_1 \cos vx, \quad (8)$$

где  $N_1$  и  $\Psi_1$  – комплексные постоянные.

Внося (6), (7) и (8) в уравнения (5) и умножая результат скалярно на координатную функцию в области  $(-a < x < a)$ , получим

$$\begin{aligned} & \left\{ \beta k_\omega^2 D_e - D_a (\rho^2 + v^2) - \alpha - i \left[ \omega_r + \frac{\beta}{\omega_e \tau_e} \frac{b_e}{b_i} k_y \rho (2D_a + (\omega_e \tau_e)^2 (D_a + D_i)) \right] \right\} N_1 - \\ & - \left( F_2 + i \frac{2}{3} \omega_e \tau_e k_y \rho \right) \beta b_e \frac{n_0^*}{2} \Psi_1 = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\left[ D_i k^2 - D_a \rho^2 - \alpha - i (\omega_r - k_y b_i E_0) \right] N_1 + b_i \frac{n_0}{2} F_1 \Psi_1 = 0, \quad (10)$$

где

$$F_1 = \frac{\rho^2}{6} + \frac{v^2}{2} + k^2; \quad F_2 = \frac{\rho^2}{6} + \frac{v^2}{2} + k_\omega^2; \quad k_\omega^2 = k^2 + (\omega_e \tau_e k_z)^2; \quad n_0^* = \frac{2}{a} \int_{-a}^a n_0 \cos^2 vx dx.$$

Затем в (9) пренебрегаем членом  $D_a (\rho^2 + v^2)$ , т. к. он меньше величины  $\beta k_\omega^2 D_e$  в отношении  $\beta b_i / b_e$ . Тогда, используя условие нетривиальности решений для  $N_1$  и  $\Psi_1$ , из (9), (10) получим

$$\alpha = D_i k^2 - D_a \rho^2 + F_1 \frac{F_2 k_\omega^2 D_e b_i / b_e - 2/3 (k_y \rho)^2 [2D_a + (\omega_e \tau_e)^2 (D_a + D_i)]}{F_2^2 + (2/3 \omega_e \tau_e k_y \rho)^2}; \quad (11)$$

$$\omega_r = k_y b_i E_0 - k_y \rho F_1 \frac{2/3 \omega_e \tau_e k_\omega^2 D_e b_i / b_e + F_2 [2D_a + (\omega_e \tau_e)^2 (D_a + D_i)] / \omega_e \tau_e}{F_2^2 + (2/3 \omega_e \tau_e k_y \rho)^2}. \quad (12)$$

Если  $\alpha < 0$ , то исходное состояние неустойчиво, а критерий неустойчивости принимает вид  $\{D_i k^2 [F_2^2 + (2/3 \omega_e \tau_e k_y \rho)^2] + F_1 F_2 k_\omega^2 D_e b_i / b_e\} < \rho^2 \{D_a [F_2^2 + (2/3 \omega_e \tau_e k_y \rho)^2] + 2/3 k_y^2 [2D_a + (\omega_e \tau_e)^2 (D_a + D_i)]\}$ .

**Анализ результатов.** Обозначим через  $v_0^2$  величину  $v^2$ , при которой числитель дроби в формуле (11) равен нулю:

$$v_0^2 = \frac{2b_e}{k_\omega^2 b_i D_e} \left\{ \frac{2}{3} (k_y \rho)^2 [2D_a + (\omega_e \tau_e)^2 (D_a + D_i)] - k_\omega^2 \frac{b_i}{b_e} D_e \left( \frac{\rho^2}{6} + k_\omega^2 \right) \right\}.$$

Тогда данный числитель можно записать следующим образом:



$$M = 1/2k_a^2 b_i D_e (\gamma - 1) v_0^2 / b_e; \quad (v^2 = \gamma v_0^2).$$

Отсюда следует:

1. Если волновые числа таковы, что  $\gamma \geq 1$  (т. к.  $v_0^2$  не может быть меньше нуля), то инкремент будет не больше  $D_a \rho^2$ , т. е.

$$|\alpha| \leq (0,5 \omega_e \tau_e b_i F_0)^2 D_a^{-1}. \quad (13)$$

2. При других волновых числах

$$|\alpha| \leq (D_a \rho^2 + Q)^2,$$

где  $Q$  – верхний предел дроби  $\frac{2/3(k_y \rho)^2 [2D_a + (\omega_e \tau_e)^2 (D_a + D_i)] F_1}{F_2^2 + (2/3 \omega_e \tau_e k_y \rho)^2}$ .

Множитель  $2/3(k_y^2 F_1)$  не больше знаменателя этой дроби. Поэтому

$$Q = \rho^2 [2D_a + (\omega_e \tau_e)^2 (D_a + D_i)]$$

и, следовательно,

$$|\alpha| < D_a^{-1} (\omega_e \tau_e b_i E_0)^2 [1 + (\omega_e \tau_e)^2]. \quad (14)$$

Сравнивая соотношения (13) и (14), можно говорить, что при любых значениях волновых чисел инкремент меньше величины

$$D_a^{-1} (\omega_e \tau_e v_{i0})^2 [1 + (\omega_e \tau_e)^2]; \quad (v_{i0} = b_i E_0),$$

где  $v_{i0}$  – направленная (токовая) скорость ионов в исходном состоянии плазмы.

В формуле (12) дробь меньше величины  $\omega_0$ :

$$\omega_0 = k_y \rho \left\{ \frac{b_i}{b_e} \omega_e \tau_e D_e + \frac{1}{\omega_e \tau_e} [2D_a + (\omega_e \tau_e)^2 (D_a + D_i)] \right\} = k_y b_i E_0 [1 + (\omega_e \tau_e)^2].$$

Следовательно, при любых волновых числах выполняется неравенство

$$|\omega_r| < k_y v_{i0} [1 + (\omega_e \tau_e)^2].$$

Величина  $\omega_r$  может быть как положительной, так и отрицательной. Это указывает на возможность существования прямых и обратных волн.

С увеличением  $v^2$  отрицательная часть дроби в (11) уменьшается более заметно, чем положительная. Следовательно, уменьшение толщины плазменного слоя приводит к снижению его неустойчивости.

Рассмотрим баланс заряженных частиц в плазменном слое. Баланс частиц в слое определяется диффузными потоками, действующими вдоль оси  $x$ , и ионизацией, т. к. в исходном состоянии диффузные потоки заряженных частиц по осям  $y$  и  $z$  не зависят от соответствующих координат. Это является объяснением, почему эти потоки не проявляются в балансе частиц.

В направлении оси  $x$  потоки частиц инициируются индуцированным электрическим полем и градиентом их концентрации, а в случае электронов – и внешним электрическим полем. Скорости дрейфа частиц в этом направлении равны, и режим диффузии будет амбиполярным, который поддерживается электрическими полями. Потоки электронов  $\Gamma_{0x}^e$  и ионов  $\Gamma_{0x}^i$  определяются соотношением

$$\Gamma_{0x}^e = \Gamma_{0x}^i = \frac{\beta b_e}{\beta b_e + b_i} D_a N_0 e^{0x} (\rho \cos vx + v \sin vx),$$

где  $\rho \cos vx + v \sin vx = 0$ , левее точки  $x = 1$  эти потоки направлены против оси  $x$ , правее этой точки – по оси  $x$ . Общее число частиц, уносимых каждым из потоков  $\Gamma_{0x}^e$  и  $\Gamma_{0x}^i$  в единицу времени из объема  $2a \times 1 \times 1$ , равно

$$2 \frac{\beta b_e}{\beta b_e + b_i} v N_0 \text{ch} \rho a.$$

Из-за ионизации такое же количество частиц каждого сорта появляется в единицу времени в указанном объеме. Следовательно, баланс частиц в слое обеспечен, поэтому исходное состояние можно считать как равновесное.

Чтобы рассмотреть баланс частиц в возмущенном состоянии, привлечем уравнение непрерывности ионов в возмущениях:

$$i(\omega_r + \alpha)n_1 = -b_i \left[ \frac{\partial n_0}{\partial x} \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} + n_0 \Delta \Psi_1 + \frac{\partial}{\partial x} \left( n_1 \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} \right) - E_0 \frac{\partial n_1}{\partial y} \right] - D_i \Delta n_1 - Z n_1, \quad (15)$$

где  $n_1$  и  $\Psi_1$  задаются соотношениями (8). В последних между величинами  $N_1$  и  $\Psi_1$  существует следующая связь (10):

$$\Psi_1 = \aleph N_1 e^{i\delta}; \quad \text{tg} \delta = \frac{\omega_r - k_y b_i E_0}{\alpha + D_a \rho^2 - D_i k^2}; \quad \aleph = \text{const.}$$

Придерживаясь идеи метода Галеркина, используем условие ортогональности (15) по отношению к базисной функции  $\cos vx$ .

Введем обозначение:

$$\{f\}^* = \int_{-a}^a f \cos vx dx.$$

Тогда получим

$$\begin{aligned} \{n_1\}^* &= N_1 a; \quad \{\Delta n_1\}^* = -(v^2 + k^2) N_1 a; \quad \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( n_1 \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} \right) \right\}^* = -\frac{v^2}{b_i} D_e N_1 a; \quad \theta = -\frac{b_i}{2} F_1 \{n_0\}^* \aleph N_1 a \cos \delta; \\ \theta &= \text{Re} \left( \left\{ \frac{\partial n_0}{\partial x} \frac{\partial \Psi_1}{\partial x} \right\}^* + \{n_0 \Delta \Psi_1\}^* \right). \end{aligned}$$

Теперь определим физический смысл отдельных членов в формуле (11). Два первых члена характеризуют эффект ионизации и изменения диффузных потоков, вызванных градиентом возмущенной концентрации частиц и действием на эту концентрацию индуцированного в исходном состоянии электрического поля:

$$-Z \{n_1\}^* - D_i \{\Delta n_1\}^* - b_i \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( n_1 \frac{\partial \Psi_0}{\partial x} \right) \right\}^* = D_i k^2 - D_a \rho^2,$$

т. к.  $Z \approx D_a (\rho^2 + v^2)$ . При этом указанное изменение потоков, в противоположность ионизации, стабилизирует исходное состояние плазменного слоя. Роль члена  $\theta$  зависит от знака  $\cos \delta$ . При  $\cos \delta > 0$ , что означает  $(\alpha + D_a \rho^2 - D_i k^2) > 0$ , этот член будет стабилизирующим, при  $(\alpha + D_a \rho^2 - D_i k^2) < 0$  – дестабилизирующим. Сравнивая вещественную часть уравнения (15) с (11), можно констатировать, что условие  $\cos \delta > 0$  эквивалентно следующему:

$$F_2 k_\omega^2 D_e b_i / b_{e<}^2 (k_y \rho)^2 \left[ 2D_a + (\omega_e \tau_e)^2 (D_a + D_i) \right],$$

а величина  $\theta$ , обусловленная действием возмущённого электрического поля  $E'_x$  на равновесную концентрацию ионов, адекватна третьему члену в (11).

Роль возмущённого электрического поля иллюстрируется рис. 1. Здесь график 1 – распределение равновесной концентрации, а графики 2 ( $\cos \delta > 0$ ,) и 3 ( $\cos \delta < 0$ ) – возможные распределения  $x$ -компонент возмущённого электрического поля  $E'_x$ . График 3 предоставляет возможность определить дестабилизирующую роль возмущённого поля, которая заключается в продвижении ионов к середине плазменного слоя под действием этого поля.

Нарушение баланса между частицами, покидающими слой, и частицами, возникающими из-за ионизации, приводит к возникновению неустойчивости плазменного слоя, т. к. в последнем образуется избыточное, по сравнению с равновесным состоянием, число частиц. Последнее можно найти, умножив правую часть уравнения (15) на  $\cos \varphi x$  и проинтегрировав её по объёму  $2a \times \tau_y \times \tau_z$  ( $\tau_y, \tau_z$  – соответственно длина полуволны в направлениях  $y$  и  $z$ ). Вследствие адекватности дроби в (11) и величины  $\theta$  условие неустойчивости можно записать таким образом:

$$F_2 k_{\omega}^2 \frac{b_i}{b_e} D_e < \frac{2}{3} (k_y \rho)^2 [2D_a + (\omega_e \tau_e)^2 (D_a + D_i)]; D_i k^2 < D_a \rho^2 + \frac{b_i}{2} F_1 n^* \aleph |\cos \delta|. \quad (16)$$

**Некоторые выводы.** Минимая часть уравнения (15) даёт результат, совпадающий с (12), но через коэффициент  $\aleph$ .

Рассмотрение уравнения непрерывности для электронной компоненты приведёт к аналогичным результатам, т. е. к соотношениям (11), (12) и (16), поскольку

$$\nabla \Gamma_1^e = \nabla \Gamma_1^i,$$

где  $\Gamma_1^e$  и  $\Gamma_1^i$  – соответственно линеаризованные диффузные потоки электронов и ионов. Но роль отдельных членов в этом уравнении иная, нежели в уравнении непрерывности для ионов. Это обусловлено антипараллельным движением электронов в электрическом поле и движением их под действием лоренцевых сил. Теперь сформулируем условие, при котором возмущённое поле  $E'_x$  получает распределение, аналогичное графику 3 на рис. 1.

Ориентация полей в плазменном слое приведена на рис. 2. Индуцированное в равновесном состоянии электрическое поле  $E$  изменяется вдоль координаты  $x$  (7), правее плоскости  $yz$ , проходящей через точку  $m$  (правая область), это поле направлено по оси  $x$ , левее этой плоскости (левая область) – навстречу.

Электроны движутся в положительном направлении оси  $x$  со скоростью  $\omega_e \tau_e b_{e\perp} E_0$  под действием полей  $B$  и  $E_0$ .

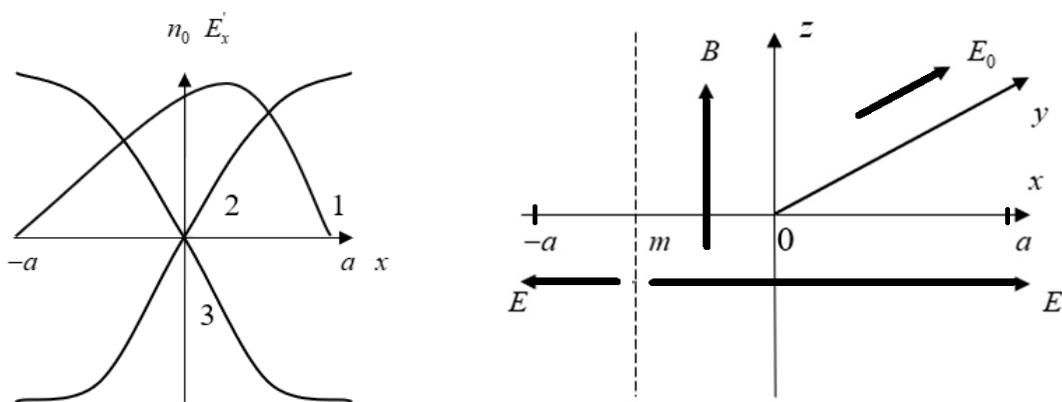


Рис. 1. Распределение равновесной концентрации и электрического поля

Рис. 2. Ориентация полей в плазменном слое

Из-за того что скорость ионов меньше (если пренебречь их циклотронной частотой, она равна нулю), заряды разделяются, что приводит к возникновению электрического поля  $E_{01}$  и в плазменном слое. Это поле направлено в положительном направлении оси  $x$ .

Под действием магнитного и электрического полей электроны дрейфуют в направлении оси  $y$  и вызывают появление электрического поля  $E_1$  в левой области направлено по оси  $y$ , в правой области – навстречу. Поля  $E_1$  и  $B$  вызывают дрейф электронов уже по оси  $x$ , что является причиной индуцирования электрического поля  $E_2$ , ориентированного параллельно оси  $x$  в левой области и антипараллельно – в правой. В результате  $x$ -компонента индуцированного поля определяется как  $i(E_{01} + E_2)$  в левой области и  $i(E_{01} - E_2)$  – в правой. Отсюда следует, что распределение возмущённого поля  $E_x'$  по типу кривой 3 (см. рис. 1) возможно, если в правой области выполняется условие  $E_2 > E_{01}$ , что равносильно требованию  $E_1 > E_0$  или  $\omega_e \tau_e E > E_0$ .

**Заключение.** В слабоионизованной плазме из-за столкновения с нейтральными атомами дрейф заряженных частиц происходит с разной скоростью. Это различие в дрейфовых скоростях может явиться причиной возникновения неустойчивости плазмы. В результате воздействия электрического поля, обусловленного большей скоростью электронов по сравнению со скоростью ионов, и магнитного поля возникает дрейф частиц в отрицательном направлении оси  $x$  (против направления действия внешнего электрического поля). Поэтому если градиент концентрации в исходном состоянии был направлен против оси  $x$ , то такое состояние не может быть устойчивым.

В устройствах с неоднородным плазменным потоком, в котором плазменные (проводящие) слои чередуются с непроводящими, наблюдается неоднородность концентрации в направлении, перпендикулярном к внешнему электрическому полю.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ким, К. И. МГД-генераторы на поршневых потоках / К. И. Ким, К. К. Ким. – М.: Маршрут, 2005. – 300 с.
2. Ким, К. К. Модификация свойств материалов воздействием низкотемпературной плазмы / К. К. Ким, Г. Л. Спичкин, С. Н. Иванов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № I-1 (29). – С. 75-81.
3. Ким, К. К. Аспекты МГД-теории работы системы скользящего токосъёма с контактными кольцами / К. К. Ким, С. Л. Колесов // Электричество. – 2002. – № 10. – С. 44-50.
4. Ким, К. К. Групповое свойство уравнений индукции для сплошной среды с нелинейной электропроводностью МГД-генератора / К. К. Ким // Вестник инженеров железнодорожного транспорта: межвуз. сборник научных трудов. – 2003. – № 1. – С. 433-443.
5. Ким, К. К. Характеристики асинхронной машины в режимах регулирования скорости / К. К. Ким, К. И. Ким, В. В. Вешкин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 25-36.
6. Ким, К. К. Влияние скорости ротора асинхронной машины на характер протекания переходных электромагнитных процессов / К. К. Ким, К. И. Ким // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № IV-1 (40). – С. 28-36.
7. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – Долгопрудный: Интеллект, 2009. – 736 с.
8. Велихов, Е. Л. Физические явления в газоразрядной плазме / Е. Л. Велихов, А. С. Ковалев, А. Т. Рахимов. – М.: Наука, 1987. – 160 с.
9. Никандров, Д. С. Низкочастотный барьерный разряд в таунсендском режиме / Д. С. Никандров, Л. Д. Цендин // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75, вып. 10. – С. 29-38.



Янченко А. В., Чураков А. Е.  
A. V. Yanchenko, A. E. Churakov

## АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УНИПОЛЯРНОГО ГЕНЕРАТОРА С КАТЯЩИМСЯ ТОКОСЪЁМОМ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА ИМПУЛЬСНОГО ТОКА ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

### ANALYSIS OF USE OF A UNIPOLAR GENERATOR WITH A ROLLING CURRENT AS A SOURCE OF PULSED CURRENT FOR CONTACT WELDING

**Чураков Александр Евгеньевич** – студент Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(924)410-80-15. E-mail: sc15112000@gmail.com.  
**Alexander E. Churakov** – Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(924)410-80-15. E-mail: sc15112000@gmail.com.

**Янченко Андрей Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)187-39-86. E-mail: ayanchenko@mail.ru.

**Andrei V. Yanchenko** – PhD in Engineering, Associate Professor, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)187-39-86. E-mail: ayanchenko@mail.ru.

**Аннотация.** В статье рассматривается применение униполярного генератора в качестве источника импульсного тока для контактной сварки. При этом учитываются особенности контактной сварки при использовании накопителей энергии, в качестве которых выступают конденсаторные машины (ёмкостные накопители) и униполярные машины (инерционные накопители). Показаны особенности и преимущества униполярных машин с катящимся токосъёмом. Приводится сравнение параметров контактной сварки конденсаторных машин с параметрами источника питания на базе униполярных генераторов.

**Summary.** The article considers the use of a unipolar generator as a source of pulsed current for contact welding. It takes into account the peculiarities of contact welding when using energy accumulators, which are capacitor machines (capacitive accumulators) and unipolar machines (inertial accumulators). The features and advantages of unipolar machines with rolling current collectors are shown. A comparison of the contact welding parameters of capacitor machines with the parameters of a power supply based on unipolar generators is given.

**Ключевые слова:** контактная сварка, источник питания, накопитель энергии, конденсаторная машина, параметры контактной сварки, униполярный генератор, катящийся токосъём.

**Key words:** contact welding, power source, energy accumulator, capacitor machine, contact-welding parameters, unipolar generator, rolling current collector.

УДК 621.791

**Введение.** К современным электротехнологическим установкам предъявляют повышенные требования по надёжности и технологичности. Сюда относятся массогабаритные показатели, энергоёмкость, срок службы и ряд других показателей. В состав электротехнологических установок часто входят различные преобразователи и накопители энергии. Одна из таких широковостребованных установок – машина электроконтактной сварки. Электроконтактная сварка позволяет получать листовые и другие неразъёмные соединения из магнитных и немагнитных металлов и сплавов. Такая сварка является более производительной, экологичной и экономичной по сравнению с дуговой. Среди многочисленных способов сварки доля контактной сварки в общем объёме соединений составляет порядка 30...40 % [1; 2; 5–8]. Контактная сварка обладает широкой областью применения – от полупроводниковых приборов и плёночных микросхем до крупных деталей и строительных конструкций. Установки электроконтактной сварки по принципу энергопитания

подразделяются на два вида: установки, получающие энергию в процессе работы прямо из электросети [1; 7; 9; 12] (например, сварочные трансформаторы), и установки, использующие для процесса сварки предварительно накопленную энергию. Сюда относятся широко используемые для сварки тонколистовых конструкций конденсаторные машины (КМ), параметры которых представлены в табл. 1.

Таблица 1  
Технические характеристики конденсаторных машин

| Тип КМ   | $P_{кз}$ , кВА | Сварочный ток, кА | Толщина соединяемых деталей, мм | Масса КМ, кг | Удельная масса КМ $M_{км}^*$ , кг/кА |
|----------|----------------|-------------------|---------------------------------|--------------|--------------------------------------|
| МТ2103Л  | 200            | 19                | 20                              | 1300         | 68                                   |
| МТ192Л   | 80             | 9                 | 11                              | 450          | 50                                   |
| МТВ6031Л | 457            | 22                | 25                              | 2500         | 114                                  |
| МТ3001   | 140            | 16                | 18                              | 1100         | 68                                   |
| МКТ1601  | 128            | 12                | 0,05...0,8                      | 400          | 33                                   |

**Особенности конденсаторных машин.** Работа конденсаторных машин основана на разряде конденсаторов через участок контактной сварки, сжатый электродами. Разряд конденсаторов проходит за очень короткий промежуток времени. Время разряда варьируется от 0,01 до 0,1 с. Таким образом, конденсаторные машины осуществляют сварку только в «жёстких» режимах, которые характеризуются более коротким импульсом тока при более высокой плотности тока (свыше 160 А/мм<sup>2</sup>). Это особенно характерно для листовых соединений лёгких сплавов [13]. Невозможность работы КМ в «мягких» режимах ограничивает применение таких машин для некоторых сплавов цветных металлов при определённой толщине соединяемых деталей (например, затруднена сварка на существующих КМ сплавов типа АМг6 толщиной 2,0 мм). Это характерно для деталей из лёгких сплавов, у которых толщина при сварке посредством современных КМ не превышает 3,0 мм. При большей толщине деталей значительно увеличивается длительность импульсов тока, что приводит к резкому увеличению габаритов и массы конденсаторов, сопутствующего оборудования и стоимости КМ в целом.

Ещё один недостаток КМ – ограниченная возможность управления сварочным током в процессе сварки. Технология контактной сварки требует корректировки формы импульса тока при определённом сочетании толщин и материалов соединяемых деталей. В КМ часто трудно получить оптимальную форму импульса, технологически требуемую при сварке некоторых деталей. Попытки преодолеть этот недостаток КМ есть (например, с помощью сочетания разрядов тока от нескольких батарей конденсаторов), но они дают положительные результаты лишь в некоторых случаях. Необходимость работы от достаточно мощной сети переменного тока является недостатком сварочных трансформаторов [16]. Для КМ следует отметить ограниченный ресурс работы конденсаторов и их высокую стоимость. Так, электролитические конденсаторы большой ёмкости имеют ресурс, определяемый их конструктивными особенностями, от 2 до 5 тыс. часов работы. При этом такие конденсаторы небезопасны и могут взрываться. Сварочные конденсаторные машины имеют средний срок службы 5 – 6 лет, а гарантийный срок эксплуатации после ремонта – не более 1 года.

**Особенности униполярных машин.** Одним из источников для контактной сварки может быть электромеханический преобразователь энергии на базе униполярной машины (УМ), которая имеет хорошую электромагнитную совместимость с машинами контактной сварки: большие значения токов (десятки и сотни килоампер) и низкие напряжения. При этом УМ эффективно работает на высоких частотах вращения, выступая как кинетический накопитель энергии, потребляя из сети сравнительно небольшую мощность приводного двигателя. Из табл. 2 видно, что в роли

накопителя энергии КМ существенно уступает по удельной энергоёмкости кинетическому накопителю в виде инерционного маховика [2].

Таблица 2  
 Сравнение накопителей энергии

| Тип накопителя энергии | Удельная энергоёмкость, Вт·ч/кг | Объёмная удельная энергоёмкость, Вт·ч/дм <sup>3</sup> |
|------------------------|---------------------------------|---|
| Конденсаторный         | 0,072                           | 0,087   |
| Инерционный маховик    | 2,780                           | 75...80   |

Структурная схема источника питания на базе УМ представлена на рис. 1.

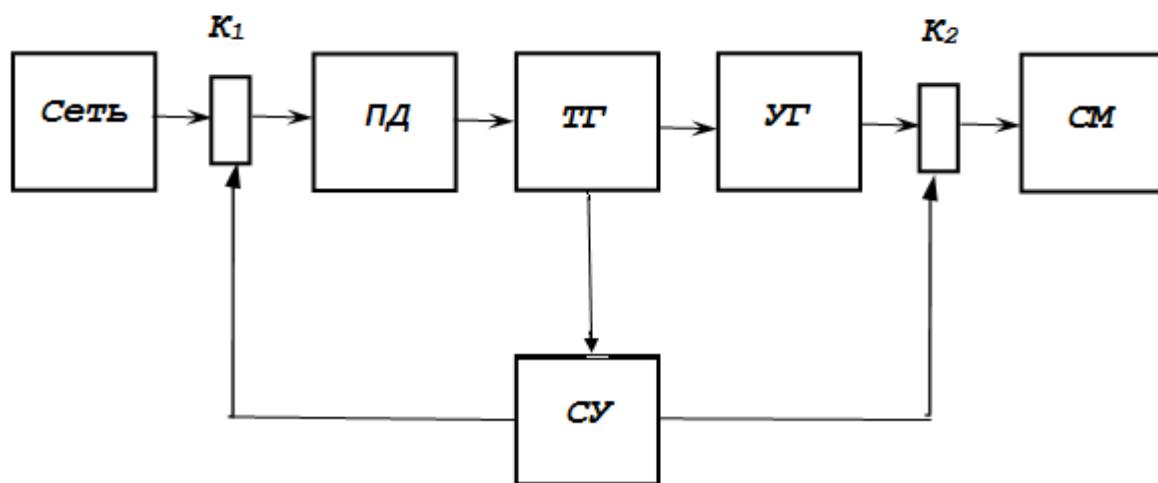


Рис. 1. Структурная схема источника тока для машины контактной сварки:  
 ПД – приводной двигатель; ТГ – тахогенератор; УГ – униполярный генератор;  
 К<sub>1</sub>, К<sub>2</sub> – контакторы; СМ – сварочная машина; СУ – система управления

Следует отметить ряд преимуществ униполярных машин по сравнению с обычными машинами постоянного тока. В УМ принципиально возможен более высокий КПД из-за отсутствия потерь в стали на вихревые токи и гистерезис. Для УМ характерны простота конструкции, более высокое использование активных материалов, температурная стойкость и долговечность. Однако у УМ есть ряд проблем, связанных с их принципом действия и конструкцией: низкие напряжения якорных обмоток и принципиальное наличие скользящего электрического контакта. При большом количестве щёток на контактных кольцах, что обусловлено большими токами УМ, щёточный токосъём становится ненадёжным и громоздким узлом. При этом значительно возрастают механические потери на трение и снижается КПД машины. Обычные металлографитные электрощётки обладают относительно низким электрическим сопротивлением (5...7 мОм), но приводят к существенным механическим потерям за счёт трения [3]. До последнего времени значения суммарных потерь в щёточном токосъёме не позволяли создать достаточно эффективную УМ.

КПД УМ с токосъёмом на базе волоконных металлических щёток выше, чем у машин с металлографитными щётками, и доходит до 86 % [17]. Но волоконные щётки имеют очень высокую цену и сложность производства.

Токосъём на основе жидкого металла обладает наименьшим электрическим сопротивлением, но требует создания сложной и дорогой подсистемы, обеспечивающей его герметичность, безопасность и приемлемый срок службы [8–11].

Эти недостатки можно преодолеть при использовании катящегося токосъёма. Экспериментальные исследования [12; 14] показали, что у машин с катящимся токосъёмом существенно снижаются потери на трение, а КПД достигает 94 % и выше. Наиболее технологичными признаны конструкции катящегося токосъёма с разрезанной обоймой (см. рис. 3, *a*) и с роликовыми сателлитами (см. рис. 3, *б*).

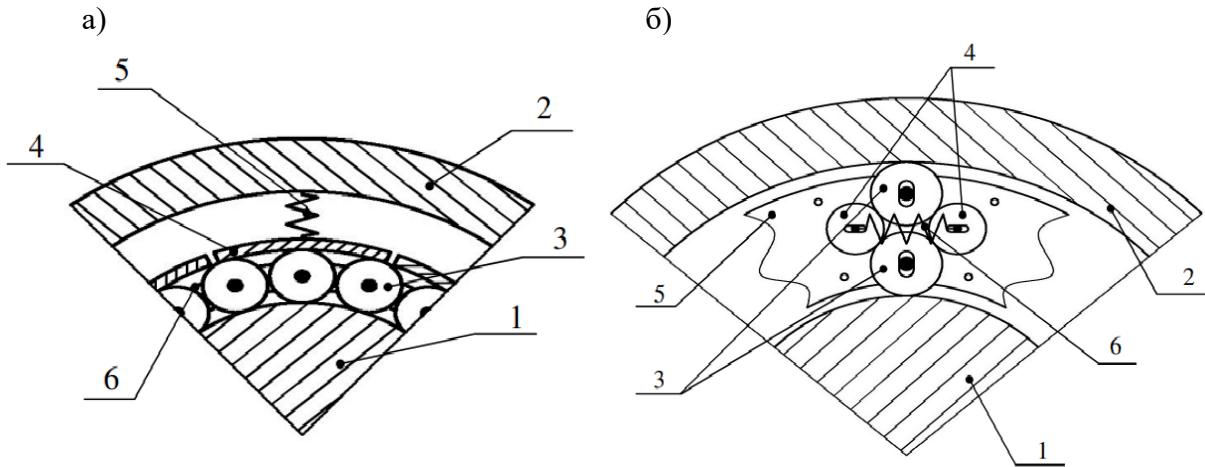


Рис. 2. Схема катящегося токосъёма: а – с разрезанной обоймой:

1 – вал; 2 – корпус; 3 – ролики; 4 – внешняя обойма из сегментов;

5 – поджимающая пружина; 6 – сепаратор;

б – с парными роликовыми сателлитами:

1 – вал; 2 – внешний корпус; 3 – ролики; 4 – две пары роликов-сателлитов;

5 – сепаратор; 6 – стягивающая пружина

В работе [8] доказано, что конструкция токосъёма с катящимися медными роликами имеет минимальное контактное сопротивление (в диапазоне 0,18...0,21 мОм) по сравнению с другими материалами.

**Результаты.** Для оценки габаритов, массы и энергетических параметров был произведен численный расчёт двух однотипных двухполюсных униполярных генераторов (УГ) мощностью 145 и 200 кВт цилиндрической конструкции с компенсационной обмоткой [4; 15] (см. рис. 2).

Каждый УГ был просчитан по методике, изложенной в [12]. Для определения электрических величин УГ рассчитывалась система уравнений:

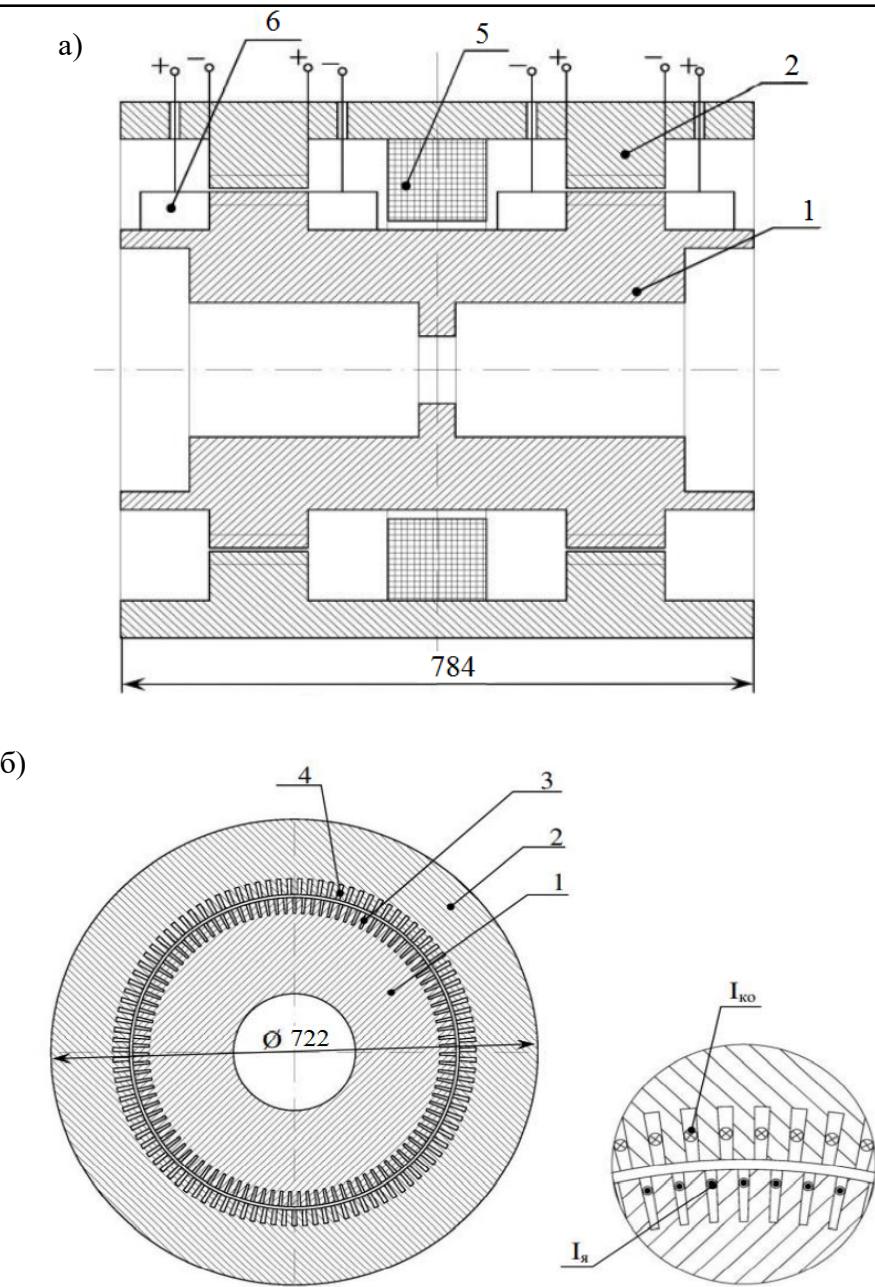
$$P_1 = 2p \cdot U_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}};$$

$$U_{\text{я}} = E - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{ко}} - U_{\text{т}},$$

$$E = \Phi_{\delta} \cdot n / 60,$$

где  $U_{\text{я}}$ ,  $I_{\text{я}}$  – соответственно напряжение и ток якоря;  $R_{\text{я}}$  – полное сопротивление якоря на полюс;  $R_{\text{ко}}$  – сопротивление компенсационной обмотки для одного полюса;  $U_{\text{т}}$  – падение напряжения на токосъёме для одного полюса;  $E$  – ЭДС на один полюс;  $\Phi_{\delta}$  – магнитный поток в воздушном зазоре.

Значение  $\Phi_{\delta}$  определялось из расчёта поля возбуждения в программе FEMM.



1 – ротор; 2 – индуктор; 3 – пазы обмотки якоря; 4 – пазы компенсационной обмотки;  
5 – обмотка возбуждения; 6 – токосъём

Рис. 3. Общий вид УГ: а – продольный вид; б – поперечный вид

Расчёт проводился для двух типов токосъёма: традиционного щёточного и катящегося с максимальным током якоря 16 кА. Это позволило их сравнить с машиной контактной сварки типа МТ-3001 с импульсным током 16 кА (см. табл. 1). В табл. 3 приведены потери в токосъёме и КПД генераторов для двух типов токосъёма: традиционного щёточного (со щётками МГСОА) и катящегося (с коническими роликами).

Таблица 3

Параметры УГ мощностью 145 и 200 кВт для двух типов токосъёма

| Параметры УГ                          | Значение параметра УГ-145 | Значение параметра УГ-200 |
|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Длина ротора, м                       | 0,784                     | 0,784                     |
| Диаметр ротора (якоря), м             | 0,515                     | 0,426                     |
| Масса ротора (якоря), кг              | 1274                      | 871                       |
| Частота вращения максимальная, об/мин | 3000                      | 4000                      |
| Момент инерции, кг·м <sup>2</sup>     | 42,22                     | 19,77                     |
| Кинетическая энергия, МДж             | 2,084                     | 1,73                      |
| $P_{ЭЛ}$ в ОЯ, КО, ОВ и шинах, Вт     | 356,4                     | 356,4                     |
| $P_{ЭЛ}$ в токосъёме, Вт              | 12 800/931                | 12 800/922                |
| $P_{МЕХ}$ в токосъёме, Вт             | 9023/287                  | 14720/257                 |
| КПД УГ                                | 76,77/97,5                | 78,5/98,6                 |
| Ток максимальный, кА                  | 16                        | 16                        |
| Напряжение якоря, В                   | 4,55                      | 6,30                      |

Примечание. ОЯ – обмотка якоря; КО – компенсационная обмотка; ОВ – обмотка возбуждения;  $P_{ЭЛ}$  – потери электрические в токосъёме;  $P_{МЕХ}$  – потери механические в токосъёме.

Из табл. 3 можно сделать вывод, что для достижения необходимой мощности и запаса энергии при снижении расчётной частоты вращения требуется увеличивать диаметр и массу ротора. При этом при меньшей частоте вращения обеспечивается более надёжная работа токосъёма.

Расчёты показали, что при переходе на катящийся токосъём электрические потери падают более чем в 13 раз, а механические – более чем в 30 раз, повышая КПД УГ примерно на 20 %. Это даёт возможность УГ с катящимся токосъёмом иметь энергетические показатели на уровне современных генераторов переменного тока, а по массогабаритным показателям приблизиться или превзойти конденсаторные машины. Для УГ мощностью 145 кВт (см. рис. 4) показаны графики изменения кинетической энергии и частоты вращения от количества импульсов тока величиной 16 кА длительностью в 1 с. Далее (см. рис. 5) представлены графики изменения тока и напряжения якоря УГ от количества импульсов с возможной зоной стабилизации тока и напряжения якоря путём регулирования поля возбуждения генератора. Зона регулирования достигает 20 % от уровня  $U_{я\text{ макс}}$ .

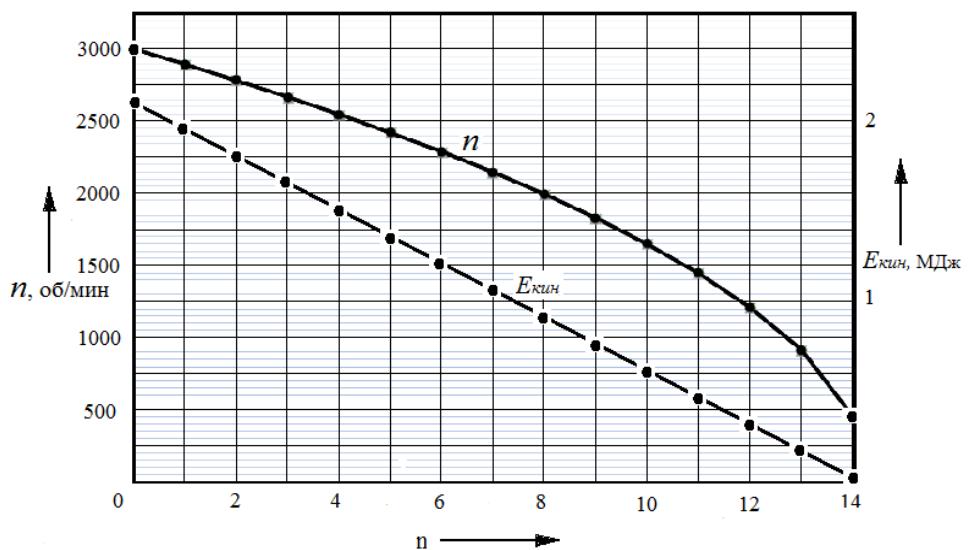


Рис. 4. Зависимость частоты вращения УГ от количества импульсов тока с одинаковой энергией

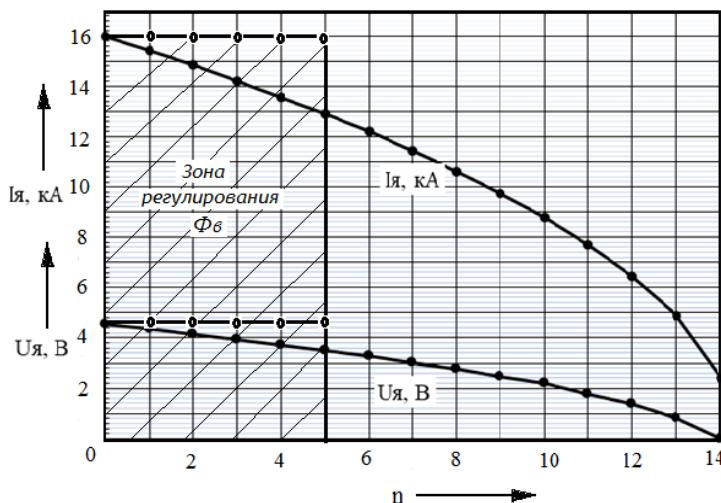


Рис. 5. Зависимость  $U_я$  и  $I_я$  от количества импульсов тока при свободном вращении УГ с выделенной областью поддержания стабильного тока с помощью регулирования  $\Phi_\delta$

Сравнение удельной массы контактной машины на базе УГ (см. рис. 6) с конденсаторной машиной показывает существенное преимущество машины с инерционным накопителем энергии при повышении частоты вращения якоря УГ выше 3...4 тыс. об/мин.

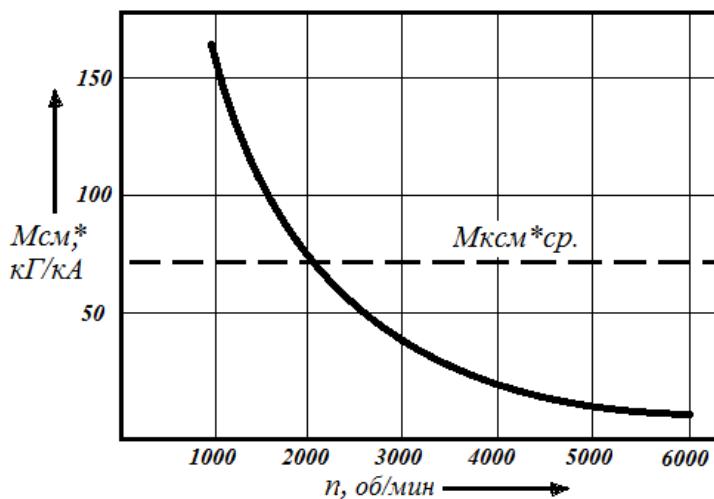


Рис. 6. Зависимость удельного показателя  $M_{cm}^*$  (кг/кА) преобразователя на базе УГ от частоты вращения якоря, где  $M_{kcm}^*_{ср.} = 67$  кг/кА – среднее значение удельного показателя для конденсаторных машин (штрих-пунктирная линия)

**Заключение.** Анализ использования униполярного генератора в качестве источника питания для контактной сварки показал его перспективность и практическую осуществимость. Контактная сварочная машина с УГ превосходит конденсаторную машину по удельной энергоёмкости и по массогабаритным показателям при частоте вращения якоря более 2000 об/мин. При этом срок службы накопителя энергии сравним со сроком службы электродвигателей, который при правильной эксплуатации составляет более 15 лет. Проблема потерь в токосъёме униполярной машины решается с помощью использования катящегося токосъёма. Возможность использования такого токосъёма в униполярной машине доказана в работах [3; 8; 12; 14]. Накопление кинетической энергии УГ позволяет получать импульсы токов для всех видов контактной сварки: точечной, шовной истыковой. Принцип инерционного накопителя позволяет получить большие сварочные токи от сравнительно маломощной сети. Расчёты показали, что в отличие от КМ в сварочных аг-

рератах с УГ можно осуществлять как «жёсткие», так и «мягкие» режимы контактной сварки с длительностью импульса тока как доли секунды, так и более одной секунды. Форму импульса тока в «мягком» режиме можно задать путём регулирования поля возбуждения УГ. При этом надо контролировать тепловые процессы элементов УГ, которые зависят от продолжительности импульсов сварочного тока.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Банов, М. Д. Технология и оборудование контактной сварки: учеб. / М. Д. Банов. – М.: Академия, 2005. – 224 с.
2. Накопители энергии: учеб. пособие для вузов / Д. А. Бут, Б. Л. Алиевский, С. Р. Мизюрин, П. В. Васюкевич. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 398 с.
3. Геча, В. Я. Определение контактного сопротивления для токосъёма униполлярной электрической машины / В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, А. К. Надкин // Труды ВНИИЭМ «Вопросы электромеханики». – 2015. – Т. 145. – С. 3-7.
4. Геча, В. Я. Конструкция компенсационной обмотки униполлярной электрической машины / В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, А. К. Надкин // Труды ВНИИЭМ «Вопросы электромеханики». – 2014. – Т. 139. – С. 7.
5. Гостевская, А. Н. Исследование влияния параметров контактнойстыковой сварки на зону термического влияния рельсов марки Э76ХФ / А. Н. Гостевская // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III-1 (51). – С. 76-81.
6. Анализ электромеханических систем методами имитационного моделирования / С. Н. Иванов, К. К. Ким, А. А. Просолович, М. И. Хисматулин // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № III-1 (51). – С. 29-38.
7. Катаев, Р. Ф. Теория и технология контактной сварки: учеб. пособие / Р. Ф. Катаев, В. С. Милютин, М. Г. Близник. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 144 с.
8. Ким, К. И. Исследование токов, индуцированных в жидкости с тензорной проводимостью бегущим магнитным полем / К. И. Ким, К. К. Ким, С. Н. Иванов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII-1 (55). – С. 4-10.
9. Ким, К. И. Критерии устойчивости режима самовозбуждения асинхронного жидкокометаллического магнитогидродинамического генератора / К. И. Ким, К. К. Ким, С. Н. Иванов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII-1 (55). – С. 11-17.
10. Ким, К. К. Триботехнические характеристики элементов скольжения электромеханических преобразователей / К. К. Ким, С. Н. Иванов, А. В. Горбунов // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № V-1 (61). – С. 113-116.
11. Основы технологии и построения оборудования для контактной сварки: учеб. пособие / А. С. Климов, И. В. Смирнов, А. В. Кудинов, Г. Э. Кудинова. – Тольятти: ТГУ, 2008. – 313 с.
12. Надкин, А. К. Исследование зонального токосъёма и реакции якоря для повышения эффективности униполлярных электрических машин: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / Надкин Александр Каренович. – М., 2017. – 143 с.
13. Орлов, Б. Д. Технология и оборудование контактной сварки: учеб. для вузов / Б. Д. Орлов, А. А. Чакалев, Ю. В. Дмитриев. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
14. Патент № 146918 Российская Федерация, МПК H02K 31/02 (2006.01). Конструкция униполлярной электрической машины с катящимися контактами: № 2014121245: заявлено 27.05.2014: опубликовано 20.10.2014 / Геча В. Я., Захаренко А. Б., Надкин А. К.; заявитель Закрытое акционерное общество «Московское техническое бюро». – 12 с.
15. Патент № 150209 Российская Федерация, МПК H02K 31/02 (2006.01). Конструкция обмотки якоря и компенсационной обмотки униполлярной электрической машины: № 2014110526: заявлено 20.03.2014: опубликовано 10.02.2015 / Геча В. Я., Захаренко А. Б., Надкин А. К.; заявитель Закрытое акционерное общество «Московское техническое бюро». – 10 с.
16. Рыськова, З. А. Трансформаторы для электрической контактной сварки / З. А. Рыськова, П. Д. Федоров, В. И. Жимерева. – 3-е изд. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 424 с.
17. Argibay N. Copper–beryllium metal fiber brushes in high current density sliding electrical contacts / N. Argibay, J. A. Baresb, J. H. Keitha, G. R. Bourne, W. G. Sawyer // Wear – 2010 – Vol. 268 – P. 1230-1236.
18. Ashok K. New High Strength Copper-Tin-Zinc Alloy for Connectors and other Conductive Springs / Ashok K. Bhargava. A // Electronic Components and Technology Conference – 2000. – P. 1139-1146.



В. И. Шаломов

V. I. Shalomov

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК НОВОЙ СОВЕТСКО-ГАВАНСКОЙ ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ

### PRELIMINARY ANALYSIS OF OPERATIONAL PARAMETERS OF STEAM TURBINE UNITS OF THE NEW SOVIET GAVAN THERMAL POWER PLANT

**Шаломов Вячеслав Иванович** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Тепловые энергетические установки» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27.

**Vyacheslav I. Shalomov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Thermal Power Plants Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenina str.

**Аннотация.** В работе рассмотрены конструктивные особенности основного оборудования и результаты предварительного анализа эксплуатационных показателей турбоустановок новой Советско-Гаванской теплоэлектроцентрали.

**Summary.** The paper considers the design features of the main equipment and the results of a preliminary analysis of the operational parameters of the turbine units of the new Soviet Gavan thermal power plant.

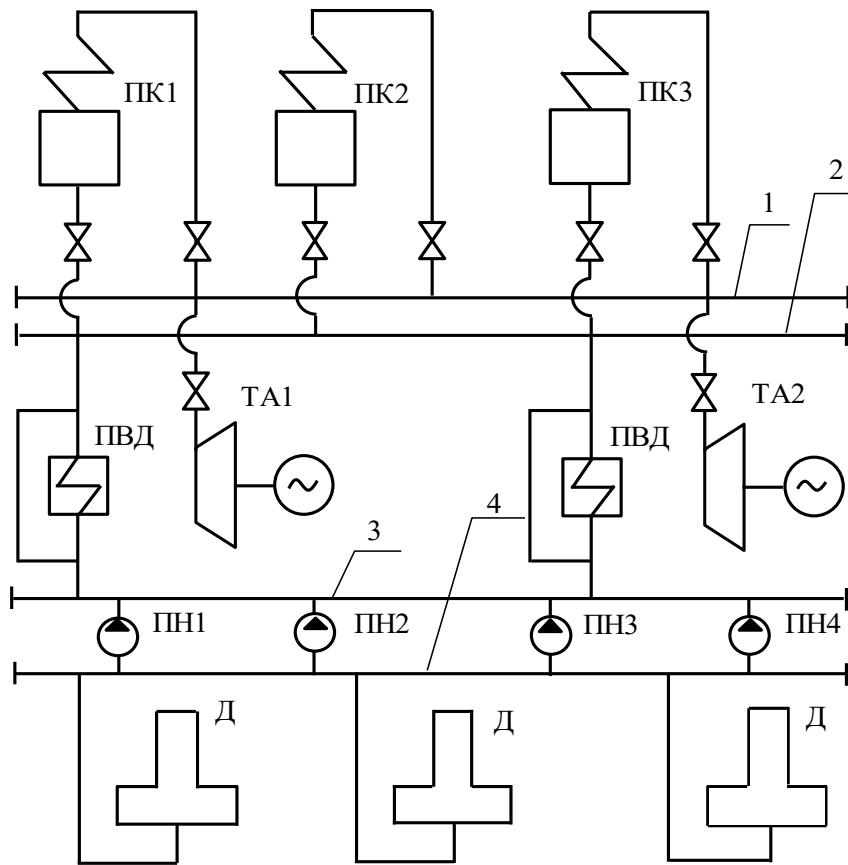
**Ключевые слова:** электрическая станция, установленная мощность, паровой котел, паровая турбина, тепловая схема, технико-экономические показатели.

**Key word:** electric station, installed capacity, steam boiler, steam turbine, thermal scheme, technical and economic indicators.

УДК 621.311

В сентябре 2020 года в Хабаровском крае введена в эксплуатацию новая электрическая станция – Советско-Гаванская ТЭЦ. Она расположена на берегу Охотского моря в городе Советская Гавань. Рост энергопотребления в Хабаровском крае составляет более 2 % в год, что должно сопровождаться опережающим развитием электроэнергетики. Новые генерирующие мощности Советско-Гаванской ТЭЦ позволят покрыть растущие потребности региона в электроэнергии и повысят надёжность энергоснабжения потребителей. Новая ТЭЦ с установленной электрической мощностью 126 МВт и тепловой мощностью 232 МВт построена на смену изношенной Майской ГРЭС, введённой в эксплуатацию в 1936 году. В год ТЭЦ в Советской Гавани будет вырабатывать 630 млн кВт·ч, что в три раза превышает выработку Майской ГРЭС. Электростанция станет надёжной основой для развития перспективного Советско-Гаванского промышленно-транспортного узла и свободного порта Ванино, где уже реализуется и планируется к реализации целый ряд проектов в области портовой инфраструктуры, переработки рыбы и морепродуктов.

Советско-Гаванская ТЭЦ – электростанция с попечечными связями (схема на рис. 1). ТЭЦ включает в себя 3 котельных агрегата типа Е-210-13,8-560 и 2 теплофикационные турбины Т-63-13/0,25. В состав схемы входят также три деаэратора питательной воды и четыре питательных насоса. В качестве топлива станция использует каменный уголь Ургальского месторождения марки «Г», расположенного в Хабаровском крае. Низшая теплота сгорания этого угля  $Q_n^p = 18\,945$  кДж/кг.



1 – магистраль свежего пара; 2 – напорная питательная магистраль; 3 – напорный коллектор питательных насосов; 4 – всасывающий коллектор питательных насосов

Рис. 1. Схема питательных трубопроводов и трубопроводов свежего пара с поперечными связями:  
ПК – паровой котёл; ТА – турбоагрегат; ПВД – подогреватель высокого давления;  
ПН – питательный насос; Д – деаэратор

Паровой котёл (ПК) типа Е-210-13,8-560 КТС (модель ТПЕ-131), изготовленный ОАО «ЭМАльянс», имеет следующие технические данные: паропроизводительность 210 т/ч, рабочие параметры пара: давление 13,8 МПа, температура 560 °С, температура питательной воды 232 °С, КПД брутто при сжигании гарантированных углей 91,5 %. В конструкцию П-образного газоплотного котла с естественной циркуляцией внесены усовершенствования. Топка по форме близка к квадратному сечению. Горелки размещены в два яруса в углах топки. Тангенциальное расположение горелок обеспечивает вертикальное вихревое растянутое горение, благодаря чему снижается механический недожог и уменьшаются выбросы оксидов азота. Водоопускные трубы вынесены за пределы кожуха, что приводит к снижению гидравлического сопротивления и повышению надёжности циркуляции. Подумали конструкторы и о совершенствовании компоновки пароперегревателей. В верхней части топки под потолком установлен разреженный (с увеличенным шагом труб) радиационный перегреватель пара. Уменьшились температурные напоры на каждую ступень пароперегревателя – повысилась надёжность. Экономайзеры, где подогревается питательная вода до температуры, близкой к температуре насыщения, мембранные типа. Увеличен шаг между пакетами теплообменника. Такое решение позволило снизить вихреобразование за трубками и золовой износ. Газоплотная схема котла устраняет подсосы воздуха. За счёт уменьшения количества теплообменных труб снижается масса котла. Технический минимум производительности ПК 30 %.

Паровая турбина Т-63-13/0,25 теплофикационная с регулируемым и нерегулируемым отопительными отборами пара служит для привода турбогенератора ТВФ-63-2У3. Турбина изготовлен-

лена на Калужском турбинном заводе. Ресурс турбины 220 000 ч. Средняя наработка на отказ не менее 8000 ч. Регулировочный диапазон автоматического изменения мощности 30...100 % от номинальной. Как видим, нижний предел диапазона 30 % совпадает с техническим минимумом нагрузки ПК (30 %).

Основные характеристики турбины: номинальная электрическая мощность 63 МВт, номинальная частота вращения ротора  $50 \text{ с}^{-1}$ ; начальные параметры пара: давление 12,75 МПа, температура 555 °C; расход свежего пара в турбину: в теплофикационном режиме (Т-режиме) 293,7 т/ч, в конденсационном режиме (К-режиме) 226 т/ч; температура питательной воды: в Т-режиме 232 °C, в К-режиме 214 °C, тепловая мощность отборов 116 МВт, расход сетевой воды 1980 м<sup>3</sup>/ч, температура сетевой воды на входе/выходе из ПСГ 70/120 °C, давление пара за турбиной при работе в Т-режиме 3,5 кПа, в К-режиме 6,7 кПа.

Турбина одноцилиндровая. Проточная часть состоит из 18 ступеней. Первая ступень является регулирующей и выполнена двухвенечной. Камерой регулируемого отопительного отбора за 14-й ступенью турбина делится на часть высокого давления (ЧВД) и часть низкого давления (ЧНД). ЧВД состоит из 14 ступеней, ЧНД – из 4 ступеней. За 12-й ступенью предусмотрен нерегулируемый отопительный отбор пара на верхний сетевой подогреватель. Принципиальная тепловая схема турбины изображена на рис. 2.

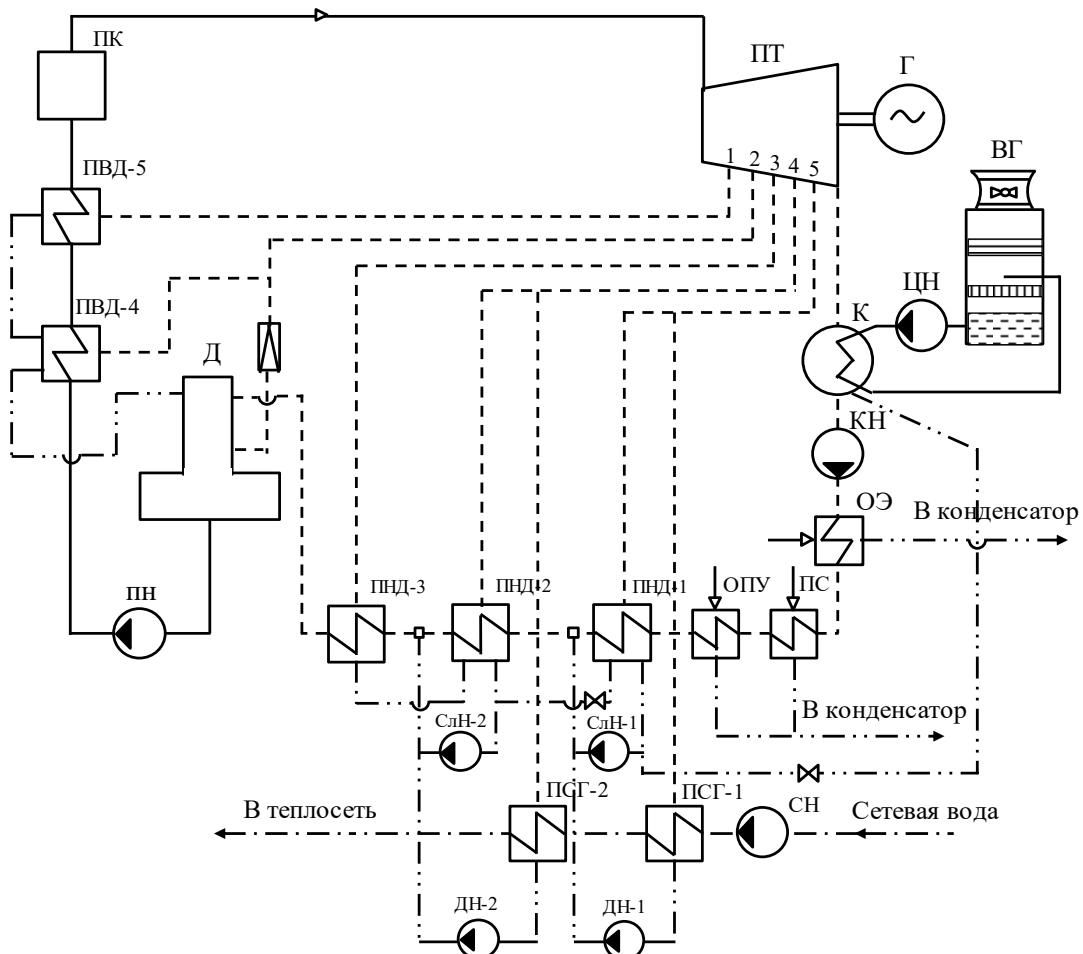


Рис. 2. Принципиальная тепловая схема ТУ Т-63-13/0,25: ПК – паровой котёл; ПТ – паровая турбина; ВГ – вентиляторная градирня; К – конденсатор; КН – конденсатный насос; ОЭ – охладитель эжектора; ПС – подогреватель сальниковый; ОПУ – охладитель пара уплотнений; ПНД – подогреватель низкого давления; СлН – сливной насос; СН – сетевой насос; ПСГ – подогреватель сетевой горизонтальный; ДН – дренажный насос; Д – деаэратор; ПН – питательный насос; ПВД – подогреватель питательной воды

**Регенеративная установка.** Регенеративные установки высокого и низкого давления обеспечивают подогрев питательной воды и основного конденсата паром, отбиаемым из турбины. Регенеративная установка (РУ) низкого давления включает в себя сальниковый подогреватель, охладитель пара уплотнений, три ПНД, РУ высокого давления – деаэратор и два ПВД. Турбина имеет 5 отборов на регенерацию. Деаэратор по пару предвключён ПВД-1, т. е. получает пар по отвлечению из 2-го отбора. Давление в деаэраторе поддерживается постоянным с помощью регулирующего клапана 0,59 МПа. Отвод конденсата отборного пара (дренажного конденсата) из ПВД осуществляется по каскадной схеме под воздействием разности давлений в деаэраторе. Дренажный конденсат из ПНД-3 отводится каскадно в ПНД-2, из которого сливным насосом № 2 перекачивается в основной конденсатный тракт после ПНД-2. Конденсат греющего пара из ПНД-1 сливным насосом № 1 перекачивается в линию основного конденсата за ПНД-1. Дренажи из ОПУ, ПС и ОЭ отводятся в конденсатор. Все регенеративные подогреватели, кроме деаэратора, поверхностного типа. Деаэратор является контактным (смешивающим) подогревателем.

**Конденсационная установка.** Для конденсации отработавшего в турбине пара предусмотрена двухходовая конденсатор типа КП-3000-3 с техническими данными: площадь поверхности охлаждения 3000 м<sup>2</sup>, максимальный расход пара (летом) 161,3 т/ч, расход охлаждающей воды 7000 т/ч, температура охлаждающей воды на входе в конденсатор 20 °С. В период работы турбины паровоздушная смесь удаляется из конденсатора основным паровоздушным эжектором марки ЭО-50М. Рабочий пар для эжектора в количестве 450 кг/ч отбирается из деаэратора. Пуск турбины обеспечивается пусковым паровоздушным эжектором ЭП-150/II. Для отсоса паровоздушной смеси и пара из уплотнений турбины в схеме предусмотрен эжектор с охладителем уплотнений. В зонах, находящихся под разрежением, применяется вакуумная арматура. Конденсат из конденсатора удаляется тремя конденсатными насосами. Уровень в конденсаторе поддерживается с помощью регуляторов уровня конденсата (РУК). Обслуживается конденсационная установка системой обратного технического водоснабжения с вентиляторной градирней. Это первый опыт применения вентиляторных градирен на Дальневосточных ТЭС. Сборная вентиляторная градирня трёхсекционная, с площадью орошения каждой секции 324 м<sup>2</sup>, противоточная, с расходом охлаждаемой воды от 12 000 до 14 000 м<sup>3</sup>/ч. Температурный перепад между нагретой и охлаждённой водой около 12 °С. Градирня устанавливается на специальный бассейн. На корпусном каркасе градирни смонтированы диффузоры с вентиляторами осевого типа.

Сетевая установка предназначена для последовательного подогрева сетевой воды паром из отопительных отборов турбины. При ступенчатом подогреве сетевой воды паром двух отопительных отборов регулирование поддерживает заданную температуру сетевой воды за ПСГ-2 (верхней ступенью подогрева). При подогреве сетевой воды одним нижним отопительным отбором температура сетевой воды поддерживается за ПСГ-1 (нижней ступенью подогрева). Сетевая установка состоит из двух горизонтальных сетевых подогревателей ПСГ-1 и ПСГ-2 типа ПСГ-1400-0,3-1.6 с площадью поверхности теплообмена 1400 м<sup>2</sup>. Подогреватель представляет собой горизонтальный поверхностный пароводяной теплообменный аппарат. ПСГ-1 питается паром из 5-го отбора в параллель с ПНД-1, ПСГ-2 – из 4-го отбора в параллель с ПНД-2. ПСГ-2 отключается от 4-го отбора запорной задвижкой. Отключение нижнего сетевого подогревателя от своего отбора не предусмотрено. ПСГ имеют организованный отсос паровоздушной смеси. Конденсат греющего пара из подогревателей дренажными насосами типа КсВ-125-140 перекачивается в линию основного конденсата: из ПСГ-1 – в точку смешения между 1-м и 2-м ПНД, из ПСГ-2 – в смеситель между 2-м и 3-м ПНД.

По итогам за 2021 г. энерговыработка турбогенераторов составила: ТГ-1 – 200 073 кВт·ч; ТГ-2 – 199 845 кВт·ч. Средняя электрическая мощность: ТГ-1 – 32,8 МВт; ТГ-2 – 36,9 МВт. Коэффициент использования электрической мощности: ТГ-1 – 36,25 %; ТГ-2 – 36,21 %. Средняя тепловая нагрузка: ТГ-1 – 14,3 МВт; ТГ-2 – 15,5 МВт. Число часов в работе: ТГ-1 – 6092 ч; ТГ-2 – 5415 ч. Число часов использования установленной мощности: ТГ-1 – 3333 ч; ТГ-2 – 3335 ч. Расход электроэнергии на собственные нужды – 4,96 %. Средний КПД котлов примерно 90 %.

Приведём в табл. 1 из суточной ведомости текущие показатели работы ТГ-1 при работе в теплофикационном режиме и расчётные номинальные параметры по данным завода-изготовителя.

Таблица 1  
Технические показатели работы турбины

| Название показателя              | Текущие эксплуатационные значения параметров | Проектные номинальные значения параметров |
|----------------------------------|--|---|
| Мощность, МВт                    | 60   | 63  |
| Начальное давление пара, МПа     | 12,35  | 12,75                                     |
| Начальная температура пара, °С   | 552  | 555                                       |
| Расход пара, т/ч                 | 235  | 294                                       |
| Давление в конденсаторе, кПа     | 4,4  | 3,5                                       |
| Температура питательной воды, °С | 214  | 232                                       |
| Температура охлаждающей воды, °С | 20   | 20  |

Для сравнительной оценки тепловой эффективности ТУ Т-63-13/0,25 на этапе опытной эксплуатации выполнены предварительные расчёты тепловой схемы турбины при работе на эксплуатационных и номинальных параметрах свежего пара на мощности 60 МВт. В расчётах сохранялись одинаковыми: тепловая нагрузка турбины  $Q_t = 105$  МВт, температура питательной воды  $t_{\text{пв}} = 214$  °С, расход пара в турбину  $D_o = 71$  кг/с, расход пара в конденсатор  $D_k = 14$  т/ч. Автоматизированный расчёт тепловой схемы ТУ построен на основе метода решения тепловых и материальных балансов [1] на базе сопряжённых компьютерных программ Mathcad и XStiem.

По расчётным данным, турбина работает с пониженным КПД по выработке электроэнергии (брутто), в частности, на 1,2 % меньше значения, соответствующего проектному варианту ТУ. Различие в удельных расходах условного топлива на выработку электроэнергии наглядно показано на графике (см. рис. 3).

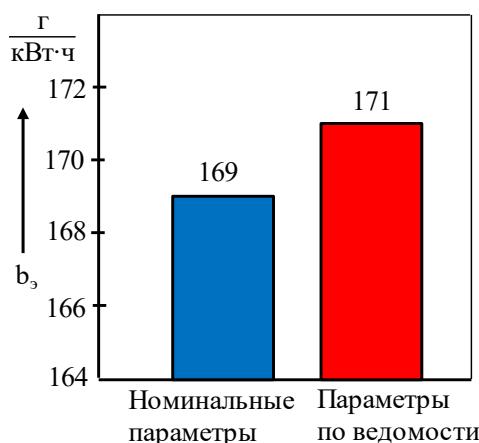


Рис. 3. Гистограмма изменения удельного расхода условного топлива

ражении – 3,15 МВт. Тогда отпускаемая электрическая мощность равна 59,85 МВт. По расчёту КПД ТУ по выработке электроэнергии нетто получился  $\eta_{\text{туэ}}^{\text{нетто}} = 0,765$ , а удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии нетто  $b_3^{\text{нетто}} = 178$  г/(кВт·ч). Полный расход условного топлива на выработку электроэнергии нетто будет равен  $B_{\text{эу}}^{\text{нетто}} = 11\,214$  кг/ч. Для паровых котлов Советско-Гаванской ТЭЦ калорийный эквивалент топлива по расчёту  $\mathcal{E}_k = 0,65$ . Если перейти к натуральному топливу, то его расход нетто  $B_{\text{эн}}^{\text{нетто}}$  будет около 17 268 кг/ч. А удельный расход –  $b_{\text{эн}}^{\text{нетто}} = 289$  г/(кВт·ч).

При мощности турбины 60 МВт перерасход условного топлива при работе на пониженных параметрах составляет 120 кг/ч, или 2,9 т/сутки.

Для оценки ожидаемых технико-экономических показателей при работе ТУ на номинальных параметрах в Т-режиме выполнен расчёт тепловой схемы при номинальной электрической нагрузке 63 МВт. Итоги расчёта приведены в табл. 2.

В табл. 2 видим, что расчётный показатель удельного расхода пара составляет 4,52 кг/(кВт·ч), что близко к проектному значению  $d = 4,66$  кг/(кВт·ч). Удельный расход условного топлива по выработке электроэнергии равен значению, полученному выше (см. табл. 1), т. е. 169 г/(кВт·ч).

Для ориентировочной оценки энергетических показателей нетто примем, что расход электроэнергии на собственные нужды ПТУ составляет 5 %, в абсолютном вы-

ражении – 3,15 МВт. Тогда отпускаемая электрическая мощность равна 59,85 МВт. По расчёту КПД ТУ по выработке электроэнергии нетто получился  $\eta_{\text{туэ}}^{\text{нетто}} = 0,765$ , а удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии нетто  $b_3^{\text{нетто}} = 178$  г/(кВт·ч). Полный расход условного топлива на выработку электроэнергии нетто будет равен  $B_{\text{эу}}^{\text{нетто}} = 11\,214$  кг/ч. Для паровых котлов Советско-Гаванской ТЭЦ калорийный эквивалент топлива по расчёту  $\mathcal{E}_k = 0,65$ . Если перейти к натуральному топливу, то его расход нетто  $B_{\text{эн}}^{\text{нетто}}$  будет около 17 268 кг/ч. А удельный расход –  $b_{\text{эн}}^{\text{нетто}} = 289$  г/(кВт·ч).

Таблица 2

Технико-экономические показатели при работе ТУ на номинальных параметрах  
с мощностью 63 МВт

| Технико-экономический показатель   | Условное обозначение | Единицы измерения | Значение показателя |
|--|----------------------|-------------------|---------------------|
| Удельный расход пара   | $d$                  | кг/(кВт·ч)        | 4,52                |
| Удельный расход теплоты ТУ на выработку электроэнергии                   | $q_3$                | кДж/(кВт·ч)       | 4471                |
| КПД ТУ по выработке электроэнергии                                       | $\eta_{туэ}$         | -                 | 0,805               |
| КПД станции по выработке электроэнергии                                  | $\eta_{эс}$          | -                 | 0,726               |
| Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии (брутто)   | $b_3$                | г/(кВт·ч)         | 169                 |
| Удельный расход условного топлива на выработку тепловой энергии (брутто) | $b_t$                | кг/ГДж            | 38,59               |

Расход электроэнергии на собственные нужды станции – это нормативный показатель. Одним из основных потребителей энергии являются питательные насосы. На схеме трубопроводов (см. рис. 1) их четыре, каждый мощностью 2000 кВт. При одной работающей турбине в работе должны находиться два насоса.

К достоинствам тепловой схемы ПТУ можно отнести применение питательных электронасосов с гидравлической муфтой (гидропередачей). На Дальневосточных ТЭС при работе ТУ на частичных нагрузках регулирование подачи питательных насосов осуществляется дросселированием питательной воды в питательном клапане перед ПК. Известно, что этот способ отличается низкой экономичностью из-за потерь напора в дроссельном клапане при его частичном прикрытии. Гидравлическая муфта позволяет плавно уменьшать частоту вращения вала насоса при постоянной частоте вращения ротора приводного электродвигателя. Подача и напор насоса согласованно уменьшаются.

На станции нашли применение и частотно-регулируемые электроприводы. Ими снабдили вентиляторы градирни системы технического водоснабжения ПТУ. Одновременно в работе находятся три вентилятора мощностью 160 кВт каждый. К сожалению, заявленные в проекте электростанции решения по сливным насосам регенеративной установки низкого давления и дренажным насосам сетевых подогревателей с частотно-регулируемым электроприводом при строительстве станции не реализованы.

Вернёмся к схеме трубопроводов свежего пара и питательной воды с поперечными связями (см. рис. 1). Сопоставив значения паропроизводительности ПК (210 т/ч) и расхода пара в турбину в теплофикационном режиме (294 т/ч), видим, что один ПК работу одной турбины на номинальных параметрах не обеспечивает. Должен одновременно работать 2-й котёл с расходом пара 84 т/ч. Отсюда вывод, что, несмотря на наличие трёх котлов и двух турбин, 100-процентный котельный резерв на станции не обеспечивается. Более рациональным был бы вариант использования поперечной схемы секционного типа, когда один котёл работал бы на свою турбину [2]. Но для этого нужно было выбирать ПК с паропроизводительностью, равной расходу пара в турбину. Тогда и полное резервирование котлов получилось бы, и надёжность электростанции стала бы выше. При существующей схеме выход из строя одного из трёх котлов сразу приводит к снижению нагрузки одной из турбин.

### Выводы.

- На этапе опытной эксплуатации для обеспечения надёжности паротурбинных установок начальные параметры пара поддерживались немногим ниже номинальных, что, безусловно, отражалось на их тепловой экономичности.



2. В тепловой схеме ПТУ электростанции внедрены энергосберегающие технологии. Примером тому являются установка питательных насосов с гидромуфтами и применение частотно-регулируемых электроприводов для вентиляторов градирен системы технического водоснабжения.

3. В конструкции паровых котлов реализован ряд технических решений, обеспечивающих повышение энергетической эффективности и надёжности котлов, снижение выбросов оксидов азота.

4. Прикидочная оценка ожидаемых технико-экономических показателей при выходе ПТУ на номинальные параметры свежего пара и питательной воды, отработке вопросов эксплуатации тепломеханического и вспомогательного оборудования ТЭЦ показала, что удельный расход топлива, предусмотренный проектом, на отпускаемую электроэнергию (нетто) может составлять 289 г/(кВт·ч).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Рыжкин, В. Я. Тепловые электрические станции: учебник для вузов / В. Я. Рыжкин, под ред. В. Я. Гришфельда. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 328 с.
2. Елизаров, Д. П. Теплоэнергетические установки электростанций: учебник / Д. П. Елизаров. – М.: Энергия, 1967. – 255 с.

# УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА MANAGEMENT, COMPUTER SCIENCE AND INFORMATICS

Черный С. П., Бузикаева А. В., Годяев А. И., Давыдов Ю. А.  
S. P. Chernii, A. V. Buzikaeva, A. I. Godyaev, Yu. A. Davydov

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЧЁТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ ВЕКТОРНО-МАТРИЧНОГО ОПИСАНИЯ

### MODELING OF A FUZZY CONTROL SYSTEM OF A DC ELECTRIC DRIVE BASED ON A VECTOR-MATRIX DESCRIPTION

**Черный Сергей Петрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электропривода и автоматизации промышленных установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: keparu@knastu.ru.

**Sergey P. Chernii** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: keparu@knastu.ru.

**Бузикаева Алина Валерьевна** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: keparu@knastu.ru.

**Alina V. Buzikaeva** – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: keparu@knastu.ru.

**Годяев Александр Иванович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь» Дальневосточного государственного университета путей сообщений (Россия, Хабаровск); 680021, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47. E-mail: at@festu.khv.ru.

**Alexander I. Godyaev** – Doctor of Engineering, Professor, Head of Automation, Telemechanics and Communications Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk); 680021, Khabarovsk Territory, Khabarovsk, st. Serysheva, 47. E-mail: at@festu.khv.ru.

**Давыдов Юрий Анатольевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Транспорт железных дорог» Дальневосточного государственного университета путей сообщений (Россия, Хабаровск); 680021, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47. E-mail: mv@festu.khv.ru.

**Yury A. Davydov** – Doctor of Engineering, Professor, Railway Transport Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk); 680021, Khabarovsk Territory, Khabarovsk, st. Serysheva, 47. E-mail: mv@festu.khv.ru.

**Аннотация.** В данной работе представлена методика синтеза интеллектуальных систем управления, основанных на структуре нечёткой модели Такаги – Сугено. Представлено построение нечёткого регулятора Такаги – Сугено, использующего концепцию «параллельно распределённой коррекции», которая базируется на внедрении нечёткой модели процесса в канал обратной связи. Такой подход позволяет получить полную информацию об объекте управления как в количественном, так и в качественном виде. Методика проектирования является концептуально простой, естественной и поясняется на примере системы управления электроприводом вращательного движения промышленного робота.

**Summary.** This paper presents a methodology for the synthesis of intelligent control systems based on the structure of the Takagi-Sugeno fuzzy model. The construction of a Takagi-Sugeno fuzzy controller using the concept of «parallel distributed correction», which is based on the introduction of a fuzzy process model into the feedback channel, is presented. This approach allows you to get complete information about the control object, both quantitatively and qualitatively. The design technique is conceptually simple, natural, and is illustrated by the example of an electric drive control system for the rotational motion of an industrial robot.

**Ключевые слова:** алгоритмы нечёткого вывода, система управления электроприводом, векторно-матричное описание, нечёткий логический регулятор Такаги – Сугено.

**Key words:** fuzzy inference algorithms, electric drive control system, vector-matrix description, Takagi-Sugeno fuzzy combined controller.

*Исследования проводятся в рамках гранта № ВНО10/2021 «Разработка принципов построения интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами на основе критерии энергоэффективности».*

УДК 681.5.01:658.5

**Введение.** Зачастую формальное описание объекта управления определяется компромиссом между рядом допущений и набором ограничений, накладываемых на систему управления в целом. С ростом сложности технологических процессов математическое описание не в полной мере способно отразить зависимости, протекающие внутри такого процесса, и ограничено лишь количественным набором параметров и характеристик. В настоящее время большинство сложных объектов управления характеризуется существенным количеством информации качественного содержания. Таким образом, обработку совокупности фактографических данных и информации, содержащейся в виде процедуры правил, целесообразно описывать с применением теории нечётких множеств, а именно моделей Такаги – Сугено [1].

Нечёткие модели служат связующим звеном между двумя подходами (количественным и качественным) и являются наиболее приемлемыми для описания слабо формализованных процессов [2]. В последнее время отмечают быстро растущий интерес к нечёткому управлению, а также повсеместное внедрение нечётких систем управления, но необходимо отметить, что многим важным вопросам не уделяется должного внимания, например анализу устойчивости, анализу производительности, методологии управления и проектирования.

С одной стороны, нечёткая логика обеспечивает простой и прямой способ декомпозиции задачи моделирования и расчёта управления в группу локальных задач, которые проще решать и обрабатывать, а также обладает механизмом, который соединяет эти задачи вместе, чтобы впоследствии составить полную модель и расчёт управления. С другой стороны, достижения в современном управлении сделали доступным большое количество средств проектирования. Однако это справедливо только в случае расчётов линейных систем управления [3].

**Постановка задачи.** На сегодняшний день известны многочисленные исследования по применению нечёткой логики для автоматического управления и распознавания образов. В числе основных промышленных применений теории можно назвать управление, диагностику неисправностей, распознавание образов, обработку изображений, анализ надёжности, проектирование систем и т. д. [4].

В качестве объекта исследования используется система автоматического управления электроприводом вращательного движения промышленного робота. Объектом управления является двигатель постоянного тока независимого возбуждения модели СЛ-569М [5]. На рис. 1 приведена структурная схема нечёткой системы управления.

Синтез нечёткой системы управления следует начать с определения нечёткой модели Такаги – Сугено.

Обозначим  $x_1(t) = \varphi(t)$ ,  $x_2(t) = \omega(t)$ ,  $x_3(t) = I_a(t)$ ,  $x_4(t) = K_E(t)$ , тогда система дифференциальных уравнений в векторно-матричной форме примет вид

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J} \cdot x_3 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_a} & -x_2 \cdot \frac{1}{R_a} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{2 \cdot 10^{-5}} \end{bmatrix} \cdot x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{R_a} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u(t).$$

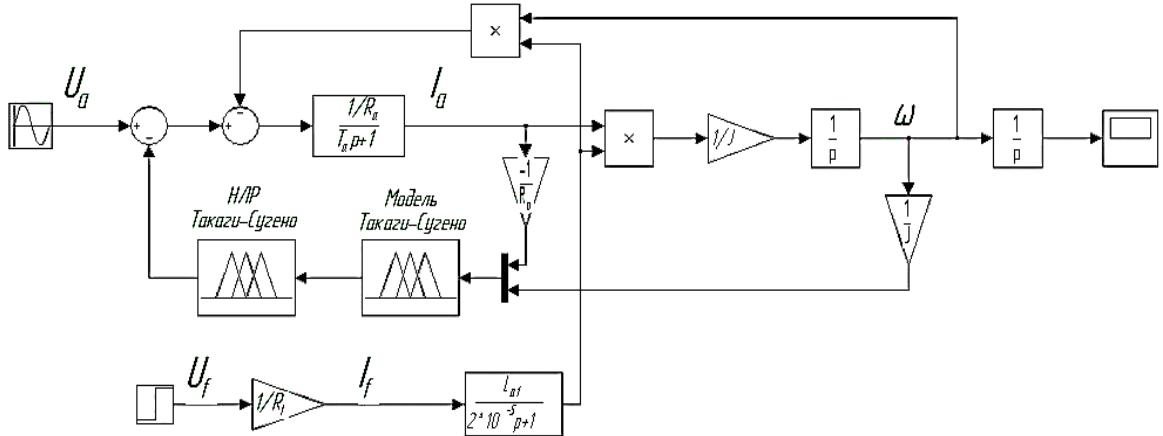


Рис. 1. Структурная схема нечёткой системы управления

В качестве переменных предпосылок примем  $z_2(t) = -x_2(t) \cdot \frac{1}{R_a}$  и  $z_3(t) = -x_3(t) \cdot \frac{1}{J}$ . Поскольку координаты реальных систем всегда ограничены, то справедливо  $x_2 \in [-2 \cdot \omega_n, 2 \cdot \omega_n]$ ,  $x_3 \in [-2.5 \cdot I_{an}, 2.5 \cdot I_{an}]$ .

Далее необходимо определить минимальные и максимальные значения посылок (границы нелинейных термов) [6]:

$$\begin{aligned} D_2 &= \max z_2(t) = \max_{x_2 \in \Omega} \left( -\frac{1}{R_a} \cdot x_2 \right) = 2 \cdot \omega_n \cdot \frac{1}{R_a}, \\ d_2 &= \min z_2(t) = \min_{x_2 \in \Omega} \left( -x_2 \cdot \frac{1}{R_a} \right) = -2 \cdot \omega_n \cdot \frac{1}{R_a}, \\ D_3 &= \max z_3(t) = \max_{x_3 \in \Omega} \left( \frac{1}{J} \cdot x_3 \right) = 2.5 \cdot I_{an} \cdot \frac{1}{J}, \\ d_3 &= \min z_3(t) = \min_{x_3 \in \Omega} \left( \frac{1}{J} \cdot x_3 \right) = 2.5 \cdot I_{an} \cdot \frac{1}{J}. \end{aligned}$$

Моделирование для двух переменных предпосылок приводит к четырём нечётким правилам. Поэтому  $\{F_{2a}, F_{2b}\}$  и  $\{F_{3a}, F_{3b}\}$  являются нечёткими множествами переменных  $z_2$  и  $z_3$  соответственно. Степень принадлежности для каждой переменной предпосылки должна удовлетворять уравнениям:

$$\begin{cases} F_{2a}(z_2) + F_{2b}(z_2) = 1 \\ F_{3a}(z_3) + F_{3b}(z_3) = 1 \end{cases}$$

Функции принадлежности термов имеют вид

$$F_{2a}(z_2) = \frac{-d_2}{D_2 - d_2} + \frac{z_2(t)}{D_2 - d_2},$$

$$F_{2b}(z_2) = 1 - F_{2a},$$

$$F_{3a}(z_3) = \frac{-d_3}{D_3 - d_3} + \frac{z_3(t)}{D_3 - d_3},$$

$$F_{3b}(z_3) = 1 - F_{3a}.$$

Назовём функции принадлежности «Положительная скорость», «Отрицательная скорость», «Положительный ток» и «Отрицательный ток» соответственно [7]. Тогда нелинейная система будет представлена моделью:

1. Если  $z_2(t)$  есть «Положительная скорость» и  $z_3(t)$  есть «Положительный ток», то  $x(t) = 40.693 z_2(t) + 12886.6 z_3(t)$ .

2. Если  $z_2(t)$  есть «Отрицательная скорость» и  $z_3(t)$  есть «Положительный ток», то  $x(t) = -40.693 z_2(t) + 12886.6 z_3(t)$ .

3. Если  $z_2(t)$  есть «Положительная скорость» и  $z_3(t)$  есть «Отрицательный ток», то  $x(t) = 40.693 z_2(t) - 12886.6 z_3(t)$ .

4. Если  $z_2(t)$  есть «Отрицательная скорость» и  $z_3(t)$  есть «Отрицательный ток», то  $x(t) = -40.693 z_2(t) - 12886.6 z_3(t)$ .

Функции принадлежности нечёткой модели представлены на рис. 2 и 3.

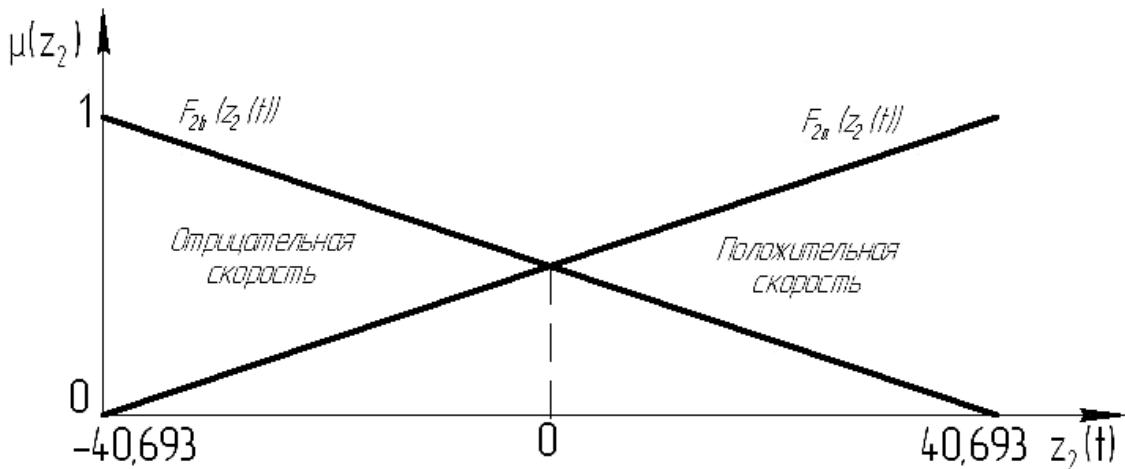


Рис. 2. Функции принадлежности  $F_{2a}(z_2)$  и  $F_{2b}(z_2)$

**Реализация нечёткого регулятора.** После получения нечёткой модели объекта необходимо рассчитать нечёткий регулятор, а именно коэффициенты обратной связи  $K_i$ , посредством решения задачи линейных матричных неравенств:

$$\begin{cases} X > 0 \\ X A_i^T + A_i X - B_i M - M^T B_i^T < 0 \\ K = M X^{-1} \end{cases}$$

при  $X = 1.4$ .

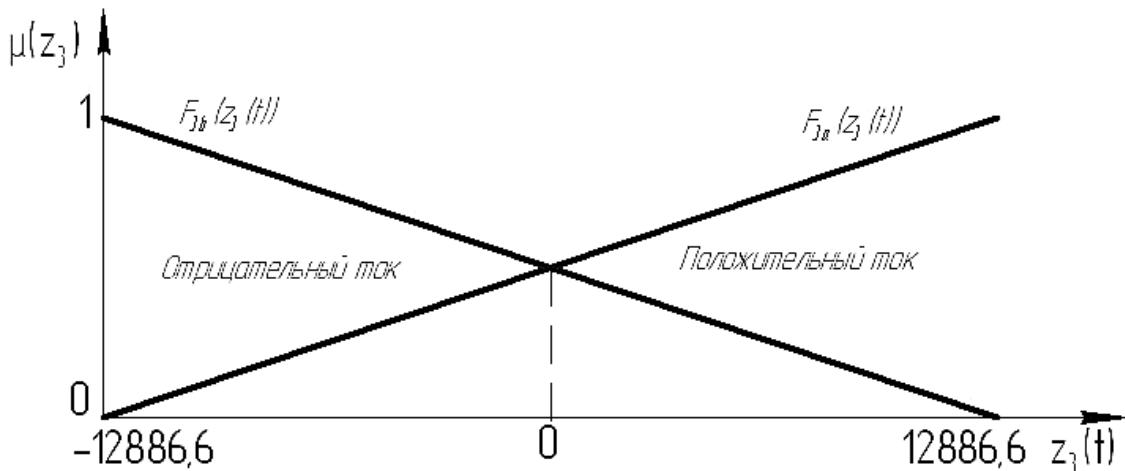


Рис. 3. Функции принадлежности  $F_{3a}(z_3)$  и  $F_{3b}(z_3)$

В результате решения получим

$$K_1 = [-0.031; -0.0063],$$

$$K_2 = [-0.0021; -0.0089],$$

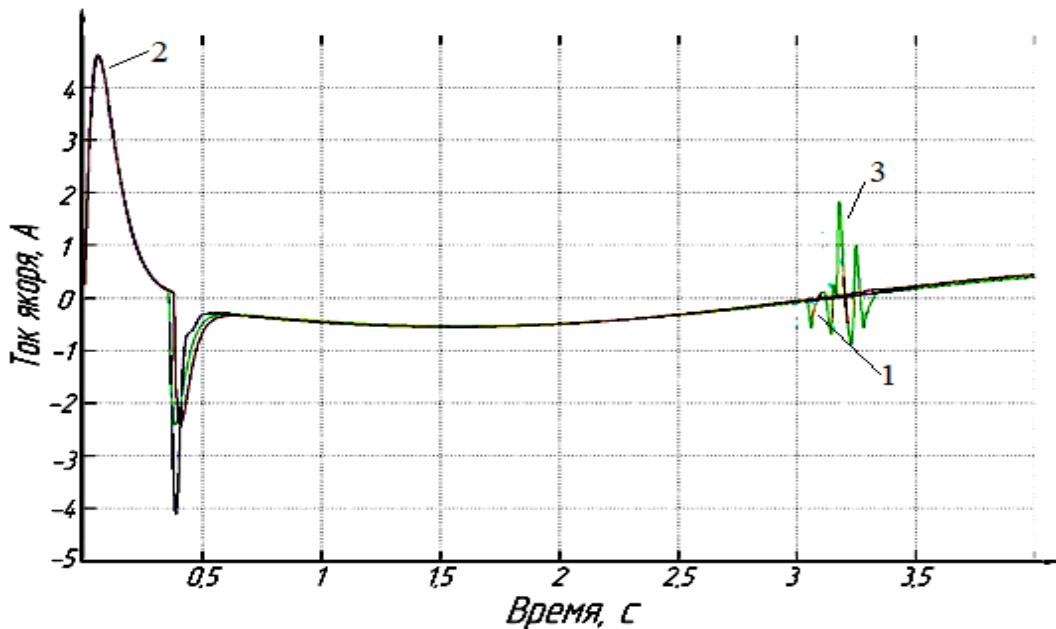
$$K_3 = [-0.089; -0.0035],$$

$$K_4 = [-0.0056; -0.037].$$

Тогда нечёткий регулятор будет представлен моделью:

1. Если  $z_2(t)$  есть «Положительная скорость» и  $z_3(t)$  есть «Положительный ток», то  $u(t) = -0.031 z_2(t) - 0.0063 z_3(t)$ .
2. Если  $z_2(t)$  есть «Отрицательная скорость» и  $z_3(t)$  есть «Положительный ток», то  $u(t) = -0.0021 z_2(t) - 0.0089 z_3(t)$ .
3. Если  $z_2(t)$  есть «Положительная скорость» и  $z_3(t)$  есть «Отрицательный ток», то  $u(t) = -0.089 z_2(t) - 0.0035 z_3(t)$ .
4. Если  $z_2(t)$  есть «Отрицательная скорость» и  $z_3(t)$  есть «Отрицательный ток», то  $u(t) = -0.0056 z_2(t) - 0.037 z_3(t)$ .

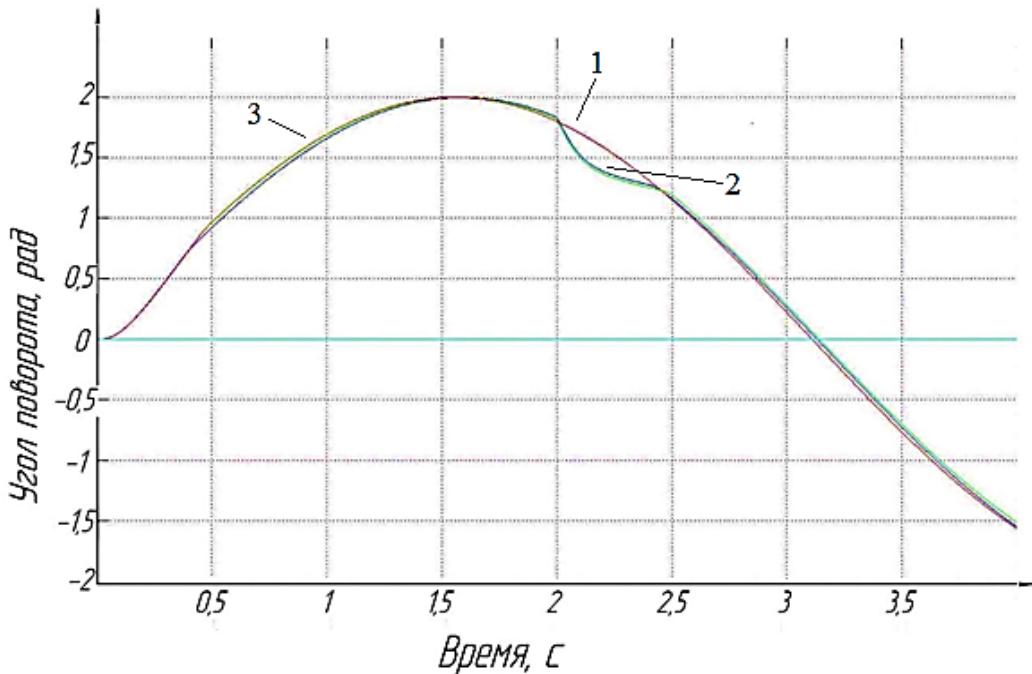
Рассмотрим динамические характеристики систем по переменным состояния при задающем воздействии синусоидальной формы амплитудой 2 В и частотой 1 рад/с. На графике (см. рис. 4) видно, что бросок тока рассчитанной нечёткой системы управления (НСУ) составляет 3.2 А, что на 23 % меньше, чем у системы с ПИД-регулятором, и на 25 % меньше, чем у НСУ по прямым показателям. Анализ графика переходных характеристик позволяет говорить о том, что все системы одинаково хорошо отрабатывают задающее и возмущающее воздействие [8].



1 – система с ПИД-регулятором; 2 – НСУ по прямым показателям; 3 – НСУ на основе ВМО

Рис. 4. Графики переходных процессов при возмущающем воздействии по току

Результаты моделирования, приведённые на рис. 5, наглядно показывают, что в контуре тока нечёткой системы управления по прямым показателям возникают колебания тока при переходе двигателя в режим реверса. Нечёткая система управления на основе векторно-матричного описания (ВМО) невосприимчива к возмущению заданной величины [9].



1 – система с ПИД-регулятором; 2 – НСУ по прямым показателям; 3 – НСУ на основе ВМО  
Рис. 5. Графики переходных процессов при возмущающем воздействии по скорости

**Заключение.** Результаты моделирования подтвердили эффективность применения представленной выше методики проектирования НСУ. Показаны достоинства метода:

- нелинейная система может быть точно представлена нечёткой системой посредством выбора соответствующих функций принадлежности;
- простота и логическое понимание процесса управления;
- облегчение процесса синтеза и некоторая универсальность рассчитанных регуляторов;
- улучшение динамики объекта;
- наличие у системы управления с нечётким регулятором Такаги – Сугено высоких адаптивных свойств, что делает возможным использование таких систем в условиях изменений параметров объекта [10].

Нечёткие системы управления с регулятором на основе модели Такаги – Сугено целесообразно использовать в управлении сложными электромеханическими объектами высокого порядка. Такие системы эффективно использовать в тех объектах, где существует необходимость формирования специфических законов управления, т. е. где качество динамики системы играет ключевую роль.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SymPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.
2. Cherny S., Khrulkov V., Vasilchenko S. Improving dynamic and energy characteristics of electromechanical systems with single-phase rectifiers // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2020. P. 9111902. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9111902.
3. Susdorf V. I., Cherniy S. P., Buzikayeva A. V. Optimization of Series Motor Drive Dynamics // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934344.
4. Savylyev D. O., Gudim A. S., Solovev D. B. Stabilizing the transients in the objects and systems controlling the compensation of nonlinear ACS (automatic control system) elements // 2019 International Science and Technology Conference «EastConf», EastConf 2019. 2019. P. 8725324. DOI: 10.1109/Eastonf.2019.8725324.

5. Башарин, А. В. Управление электроприводами: учеб. пособие / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
6. Стельмащук, С. В. Согласованное управление транспортировки ленты с модальным регулятором / С. В. Стельмащук, Д. В. Капустенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № I-1 (38). – С. 28-40.
7. Болдырев, В. В. Разработка интеллектуального модуля управления автоматизированной автономной системой энергообеспечения / В. В. Болдырев, М. А. Горьковый // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 9-18.
8. 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.
9. Стельмащук, С. В. Синтез ПИД-регулятора системы автоматического регулирования с максимальным быстродействием и ограничением на перерегулирование / С. В. Стельмащук, А. Ю. Чернов // Электротехнические системы и комплексы. – 2012. – № 20. – С. 256-265.
10. Трусов, Р. Е. Повышение точности мягких вычислений в системе поддержки процессов ситуационной оценки / Р. Е. Трусов, М. А. Горьковый // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: материалы II Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019. – С. 488-491.
11. Mazandarani M., Pariz N., Kamyad A. V. Granular differentiability of Fuzzy-Number-Valued functions // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 2018. 26(1).
12. Савельев, Д. О. Программный модуль нечёткого логического компенсатора нелинейных элементов / Д. О. Савельев, А. С. Гудим, В. Н. Хрульков // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: материалы международной научно-практической конференции. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2017. – С. 128-131.



Х. Уламбаяр, Дмитриева Т. Л.  
Kh. Ulambayar, T. L. Dmitrieva

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КАРКАСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ОПТИМАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ОКАГЭ»

### AUTOMATED DESIGN OF FRAME STRUCTURES WITH OPTIMAL PARAMETERS USING «OKAGÉ» SOFTWARE PACKAGE

**Хухуудэй Уламбаяр** – преподаватель кафедры строительных конструкций Института строительства и архитектуры Монгольского Университета Науки и Технологии (Монголия, Улан-Батор); Бага тойруу 34, г. Улаанбаатар, проспект Сухэ-Батор. E-mail: Ulambayar\_kh@yahoo.com.

**Khukhuudei Ulambayar** – Lecturer, of Civil Engineering, School of Civil Engineering and Architecture Department, Mongolian University of Science and Technology (Mongolia, Ulaanbaatar); Baga toiruu 34, Sukhbaatar district, Ulaanbaatar. E-mail: Ulambayar\_kh@yahoo.com.

**Дмитриева Татьяна Львовна** – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Механика и сопротивления материалов» Иркутского национального исследовательского технического университета (Россия, Иркутск). E-mail: dmital@ex.istu.edu.

**Tatiana L. Dmitrieva** – D. Sc. in Engineering, Head of Mechanics and Strength of Materials Department, Irkutsk National Research Technical University (Russia, Irkutsk). E-mail: dmital@ex.istu.edu.

**Аннотация.** Представлены алгоритмы и программный комплекс «ОКАГЭ», предназначенные для решения задачи оптимального проектирования металлических каркасов. Программный комплекс позволяет рассчитать геометрию конструкций с использованием типовых сечений стальных каркасов из условия минимального веса. Включает в себя полный набор проверок, рассматриваемых в российских нормах по расчёту стальных конструкций. Программный комплекс имеет графический интерфейс для обеспечения удобной коммуникации с пользователем. Представлен пример, поясняющий возможности данного ПК.

**Summary.** Algorithms and the «OKAGÉ» software package designed to solve the problem of optimal design of metal frames are presented. The software package allows you to calculate the geometry of structures using standard sections of steel frames from the condition of minimum weight (material consumption). Includes a full set of checks considered in the Russian code for the calculation of steel structures. The software package has a graphical interface for easy communication with the user. An example is provided to explain the capabilities of this PC.

**Ключевые слова:** оптимизация, нелинейное программирование, ограничение по прочности, итерационный алгоритм, стальной каркас.

**Key words:** optimization, nonlinear programming, strength constraints, iterative algorithm, space steel frames.

УДК 519.85

**Введение.** Задачи, связанные с оптимальным проектированием геометрических параметров металлоконструкций, исследовались на протяжении многих лет [1–4].

1970-80-е годы прошлого столетия были отмечены множеством разработок, где сравнивались различные вычислительные подходы к решению задач оптимизации и осуществлялся поиск наиболее эффективных и надёжных алгоритмов. В 1979 г. издана монография американских учёных Edward J. Haug и Jasbir S. Arora [5], в которой было систематизировано множество прикладных примеров оптимизации механических систем.

Теперь ясно, что единый алгоритм общего типа не может быть эффективным для всех вариантов проблемы оптимального проектирования. Тем не менее возможен поиск наиболее надёжных алгоритмов в рамках определённых классов. Так, в последние десятилетия увеличилось

использование методов и алгоритмов оптимизации на основе стохастических подходов для оптимизации объектов того или иного типа, было опубликовано несколько полноценных обзорных статей [6–8].

Очевидно, что решение задач оптимизации конструкций связано с автоматизацией алгоритмов и выполняется на основе программных комплексов. До второй половины XX в. методы оптимизации не имели широкого применения именно потому, что практическое их использование требовало огромной вычислительной работы, которую без ЭВМ реализовать практически невозможно. На 60-е годы прошлого века приходится начало многочисленных программных разработок, которые смогли реализовать достаточно сложные задачи синтеза несущих элементов зданий и сооружений. Описанию программ оптимизации стальных конструкций посвящены публикации отечественных и зарубежных авторов [9–12]. В этом ряду можно отметить российские программные разработки по оптимальному проектированию плоских стальных рам [13; 14], стальных пространственных каркасов [15; 16; 17] и ферм [18; 19].

С ростом вычислительных мощностей ЭВМ стало возможно оптимизировать большемерные строительные объекты со значительным числом варьируемых параметров и их сложными взаимосвязями между собой. Отметим лишь некоторых из них [20; 21; 23; 24].

В последнее время всё более пристальное внимание уделяется связыванию автоматизации в построении модели проектной задачи и автоматической настройке на методы численной оптимизации как способу преодоления препятствий, затрудняющих использование этих методов в практике проектирования. Инструментарий описанного в этой статье программного комплекса (ПК) «ОКАГЭ» направлен именно на такой подход. Целью статьи является иллюстрация эффективности этого ПК путём решения известного тестового примера оптимизации 72-стержневой четырёхэтажной каркасной конструкции.

**Постановка задачи оптимального проектирования конструкций.** Поставим проблему оптимизации как задачу поиска минимума расхода материала проектируемых конструкций с учётом всех нормативных требований по прочности и жёсткости. Её постановка в форме задачи нелинейного программирования следующая:

найти

$$\min f(x), \quad x \in E^{nx}, \quad (1)$$

при ограничениях

$$g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, m, \quad (2)$$

$$x_i^L \leq x_i \leq x_i^U, \quad i = 1, 2, \dots, nx, \quad (3)$$

где  $f(x)$  – функция цели от параметров  $x$ , которая минимизирует объём (вес) конструкции. Функции ограничений  $g_j(x)$  включают ограничения на состояние конструкции. Параметрические ограничения  $\{x^L\}$ ,  $\{x^U\}$  определяют интервал поиска.

Задача (1) – (3) решается на основе методов, использующих функцию Лагранжа  $F_L$  и две её модификации  $F_P$  и  $F_M$ :

$$F_L = f(x) + \{Y\}^T [\delta] \{g\}, \quad (4)$$

$$F_P = k_f F_L + 0,5 \{g\}^T [\delta] [k] \{g\} + 0,5 k_f \{Y\}^T ([\delta] - [I]) \{\Delta Z\}, \quad (5)$$

$$F_M = k_f F_L (1 - \tau) - 0,5 \tau \left\{ \frac{\partial F_L}{\partial x} \right\}^T \left\{ \frac{\partial F_L}{\partial x} \right\}, \quad (6)$$

где  $\{Y\}$  – вектор двойственных параметров. В выражения входят коэффициенты  $k_f$ ,  $k$ ,  $\tau$ , оказывающие влияние на сходимость алгоритмов,  $\Delta Z$  – величина сдвига экстремума функции  $F_P$  относительно границы допустимой области. Описание этих функций можно найти в работе [21].

**Метод прямого поиска.** Метод основан на итерационном алгоритме решения задачи (1) – (3), где использована только функция  $F_P(x, y)$ . Экстремум этой функции по  $x$  совпадает с

экстремальной точкой функции Лагранжа  $F_L$ . Нахождение оптимальных параметров сводится к задаче на максимин:

$$\max_{y \in E^m} \min_{x \in E^{nx}} F_p(x, y).$$

Наиболее устойчивым является вариант этого алгоритма, когда прямые переменные на итерации  $t$  определяются из условия минимизации функции  $F_P$ :

$$\begin{aligned} \{X\} &\in \text{Arg min } F_p(X^t, Y^t); \\ \{X^L\} &\leq \{X\} \leq \{X^U\}, \end{aligned} \tag{7}$$

а двойственные – из равенства условия стационарности по  $X$  функции Лагранжа  $F_L$  (4) и функции  $F_P$  (5):

$$y_j^{t+1} = \max \left( y_j^t + \frac{k_{jj}^t}{k_f^t} g(x^{t+1}) \right).$$

Метод обозначен авторами как «прямой», поскольку основное время поиска экстремума на итерации  $t$  здесь связано с решением задачи (7) по определению прямых переменных  $X$ .

**Комбинированный метод поиска.** В качестве альтернативного предложен алгоритм, где используются функции (5) и (6).

Вектор  $\{X^{t+1}\}$  определяется также по выражению (5), а переменные  $Y$  находятся максимизацией функции  $F_M$ :

$$\begin{aligned} \{Y^{t+1}\} &\in \text{Arg max } F_M(X^t, Y^t); \\ Y &\in E^m. \end{aligned} \tag{8}$$

После подстановки в выражение (8) функции Лагранжа  $F_L$  приравняем нулю производную этого выражения по  $Y$ , в результате чего придём в системе линейных алгебраических уравнений относительно вектора  $Y$ :

$$[W]\{\bar{Y}\} = \{P\},$$

где  $[W]$  – квадратная матрица размером  $(m^* \times m^*)$ , здесь  $m^*$  – число потенциально активных ограничений (обозначены с надчёркком). Таким образом,  $\{\bar{Y}\}$  – редуцированный до размерности  $m^*$  искомый вектор двойственных переменных.

Матрица  $[W]$  и вектор правых частей формируются через производные от функций ограничений и целевой функции по  $x$ :

$$\begin{aligned} W_{ij} &= \left\{ \frac{\partial \bar{g}_i}{\partial X} \right\}^T \left\{ \frac{\partial \bar{g}_j}{\partial X} \right\}, \\ P_i &= -k_f \left\{ \frac{\partial \bar{g}_i}{\partial x} \right\}^T \left\{ \frac{\partial f}{\partial x} \right\} + \frac{(1-\tau)}{\tau} g_i. \end{aligned}$$

Метод может быть хорошо встроен в поисковый алгоритм НЛП для случаев, когда решение в прямых переменных  $X$  выходит за пределы допустимой области и может быть «сдвинуто» на границу этой области. Определение двойственных переменных на двух соседних итерациях при этом не является взаимозависимым, как в прямом методе.

**Программный комплекс «ОКАГЭ».** На основе вышеизложенных алгоритмов авторами разработан программный комплекс «ОКАГЭ» (зарегистрирован в Реестре программ для электронных вычислительных машин в 2020 г). Он позволяет решать задачи оптимизации

стальных каркасов (в том числе содержащих гофроэлементы [22]), а также исследовать НДС этих конструкций в статической постановке.

**Структура программного комплекса.** ПК имеет простой, удобный, интуитивно понятный интерфейс, который состоит из главного окна, где реализованы вкладки «Данные», «Параметры» и «Назначить», а также дополнительного окна для модуля «Применить».

В структуре программного комплекса предусмотрено выполнение следующих трёх основных функций (см. рис. 1 и 2): «Функция 1» – ввод исходных данных; «Функция 2» – обработка данных и расчёт (программа); «Функция 3» – вывод результатов.

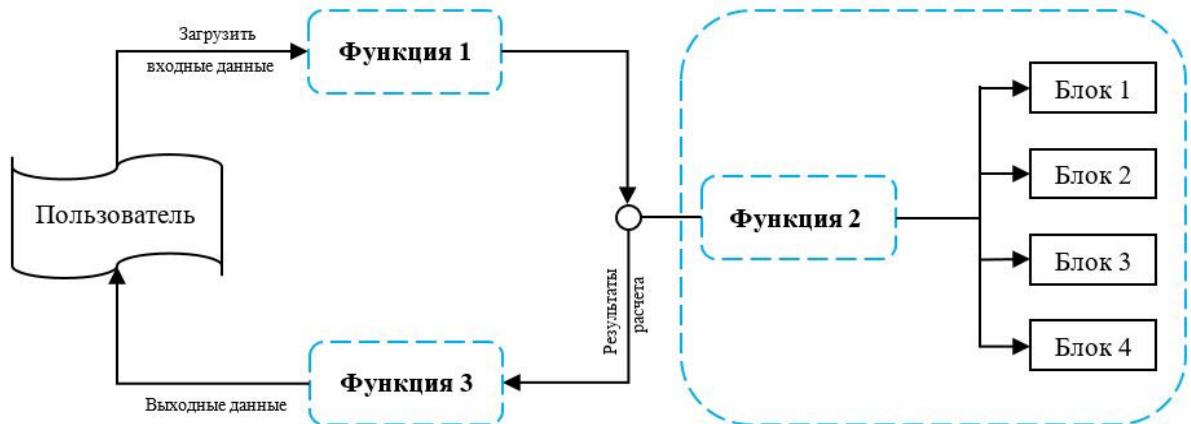


Рис. 1. Общая структура ПК «ОКАГЭ»

На рис. 3 показано окно ввода данных ПК «ОКАГЭ». Разработаны редакторы ввода, где задаются физические и геометрические параметры конструкции. Результаты представлены как текстовые и графические и выводятся в специальные файлы.

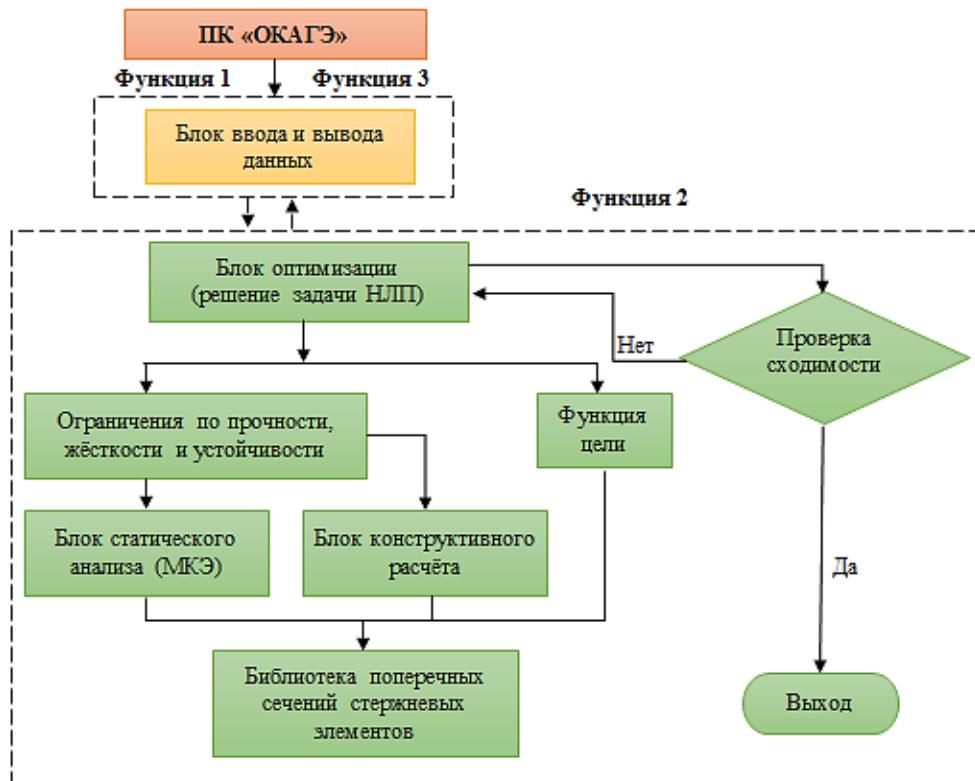


Рис. 2. Взаимосвязь основных функций программы «ОКАГЭ»

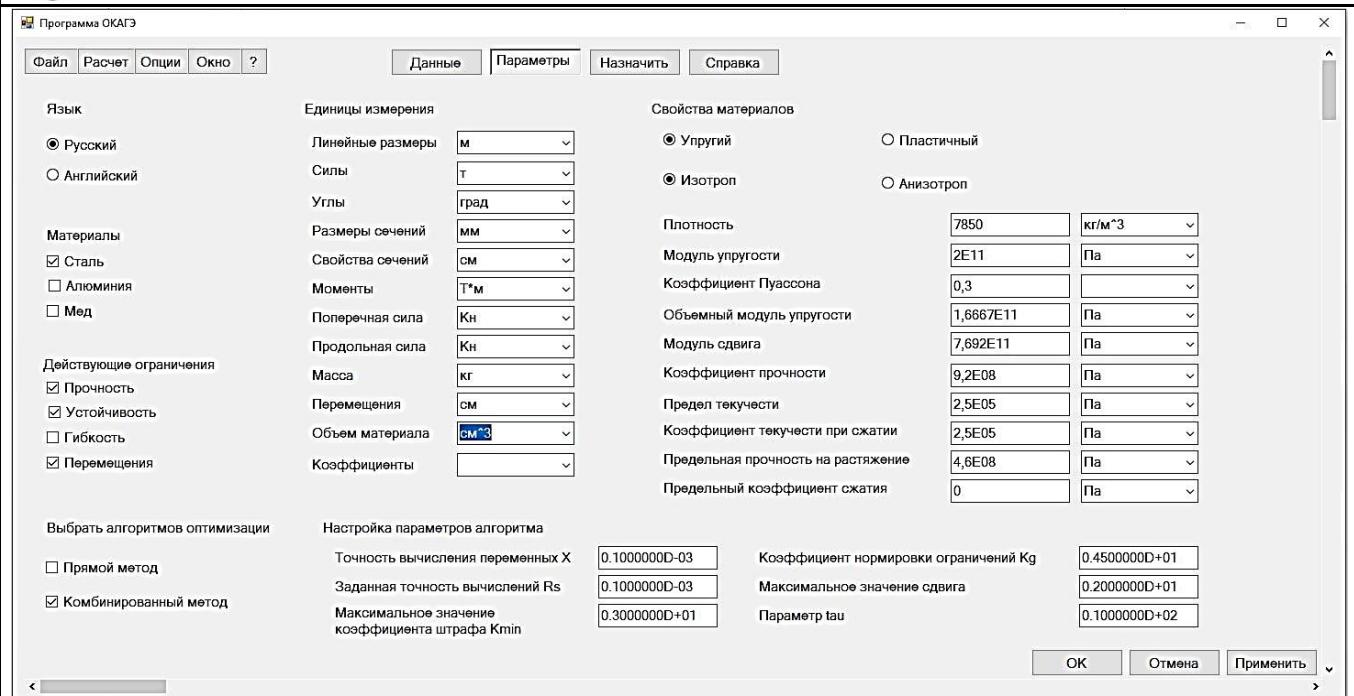


Рис. 3. Окно выбора параметров расчёта для программы «ОКАГЭ»

На функциональность программ существенное влияние оказывает задание некоторых параметров, регламентирующих кривизну функций (5), (6), и их настройка имеет большое значение. В данном ПК эти параметры задаются по умолчанию, но возможно их редактирование на диапазонах, которые предлагаются пользователю согласно инструкции.

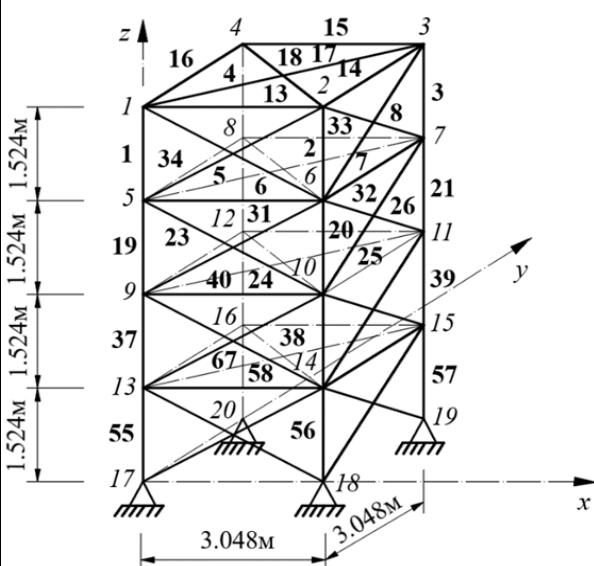


Рис. 4. Расчёчная схема стержневой четырёхэтажной каркасной конструкции  
элементов;  $A_k$ ,  $l_k$  – соответственно площадь поперечного сечения и длина  $k$ -го элемента;  $\rho$  – плотность материала.

Функции ограничений представлены в следующем виде:

1. Проверка на прочность  $i$ -й группы конструкции:

**Апробация и эффективность ПК «ОКАГЭ».** ПК «ОКАГЭ», описанный выше, был верифицирован путём решения тестовой задачи оптимизации 72-стержневой конструкции (см. рис. 4) [23; 24].

**Исходные данные:**  $E = 6897.1 \text{ кН/см}^2$ ;  $\rho = 0.2768 \cdot 10^{-4} \text{ кН/см}^3$ ;  $\mu = 0.33$ .

Приняты 2 случая загружения:

– первый:  $P_1 = 22.25 \text{ кН}$  в положительном направлении  $x$  и  $y$  и отрицательном направлении  $z$  в узле 1;

– второй:  $P_2 = 22.25 \text{ кН}$  в отрицательном направлении по оси  $z$  в узлах 1, 2, 3 и 4.

Назначено 16 групп поперечных сечений. Варьировались *площади поперечных сечений* в каждой группе, т. е. всего 16 варьируемых параметров, приведённых в табл. 1.

Целевая функция  $f(x)$  представляет собой вес конструкции:  $f = \sum_{k=1}^m \rho A_k l_k$ , где  $m = 72$  – число

элементов;  $A_k$ ,  $l_k$  – соответственно площадь поперечного сечения и длина  $k$ -го элемента;

$\rho$  – плотность материала.

$$g_j(x) = \frac{|N_i^{ip}|}{[\sigma]x_i} - 1 \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, 16; \quad ip = 1, 2; \quad j = i \cdot ip,$$

где  $x_i$  – варьируемый параметр (площадь элементов в  $i$ -й группе);  $N_i^{ip}(x)$  – расчётное продольное усилие для элементов  $i$ -й группы;  $ip$  – номер загружения;  $[\sigma] = 172.4$  МПа – допустимые напряжения. В качестве расчётного принималось усилие для наиболее нагруженного (базового) элемента в каждой группе.

Таблица 1  
Искомые параметры варьирования

| 1                                | 2                                | 3                                | 4                                | 5                                | 6                                | 7                                | 8                                |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| A <sub>1</sub> :A <sub>4</sub>   | A <sub>5</sub> :A <sub>12</sub>  | A <sub>13</sub> :A <sub>16</sub> | A <sub>17</sub> :A <sub>18</sub> | A <sub>19</sub> :A <sub>22</sub> | A <sub>23</sub> :A <sub>30</sub> | A <sub>31</sub> :A <sub>34</sub> | A <sub>35</sub> :A <sub>36</sub> |
| <b>9</b>                         | <b>10</b>                        | <b>11</b>                        | <b>12</b>                        | <b>13</b>                        | <b>14</b>                        | <b>15</b>                        | <b>16</b>                        |
| A <sub>37</sub> :A <sub>40</sub> | A <sub>41</sub> :A <sub>48</sub> | A <sub>49</sub> :A <sub>52</sub> | A <sub>53</sub> :A <sub>54</sub> | A <sub>55</sub> :A <sub>58</sub> | A <sub>59</sub> :A <sub>66</sub> | A <sub>67</sub> :A <sub>70</sub> | A <sub>71</sub> :A <sub>72</sub> |

2. Проверка на смещение узлов 1, 2, 3 и 4 по направлению осей  $x, y$ :

$$g_{iu}(x) = \frac{u_i^{ip}(x)}{[\Delta]} - 1 \leq 0, \quad i = 1, 2, 3, 4; \quad ip = 1, 2; \quad iu = 32 + i \cdot ip;$$

$$g_{iv}(x) = \frac{v_i^{ip}(x)}{[\Delta]} - 1 \leq 0, \quad i = 1, 2, 3, 4; \quad ip = 1, 2; \quad iv = 40 + i \cdot ip,$$

где  $u_i^{ip}, v_i^{ip}$  – смещение узла  $i$  по оси  $x, y$  в результате загружения  $ip$ . Предельная величина смещения  $[\Delta] = \pm 6.35$  мм. Число ограничений этого вида равно 16.

Всего в задаче получено 48 ограничений.

Нижнее параметрическое ограничение на площади элементов – 0.64516 см<sup>2</sup>.

**Требуется** подобрать площади сечений четырёхэтажной каркасной конструкции на заданном непрерывном интервале путём минимизации её объёма при условии выполнения требований по прочности и жёсткости.

**Построение исходной модели.** Координаты узлов и топология конструкции считывались из Excel-файла с учётом регулярной структуры конструкции по этажам.

Исходные значения площадей элементов каждой группы ( $X_0$ ) приняты 4 см<sup>2</sup>.

На основании анализа начального проекта конструкции взяты следующие базовые (наиболее нагруженные) элементы для каждой группы, приведённые в табл. 2.

Таблица 2  
Перечень базовых элементов для каждой группы

| № группы | 1        | 2         | 3         | 4         | 5         | 6         | 7         | 8         |
|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Элемент  | 1        | 6         | 13        | 17        | 21        | 23        | 31        | 36        |
| № группы | <b>9</b> | <b>10</b> | <b>11</b> | <b>12</b> | <b>13</b> | <b>14</b> | <b>15</b> | <b>16</b> |
| Элемент  | 39       | 44        | 50        | 54        | 57        | 59        | 68        | 72        |

Задача решена с использованием двух описанных выше прямого и комбинированного методов модифицированных функций Лагранжа. Оптимальное решение считалось достигнутым при выполнении следующих условий: а) разность в значениях искомых параметров на двух соседних итерациях не превышала заданного допуска; б) значения ограничительных функций получены в пределах заданных погрешностей.

**Результаты расчёта.** Активными были: ограничение  $g_{17} = -0.581637 \cdot 10^{-3}$  по прочности в элементе 1 при втором случае загружения; ограничения  $g_{33} = g_{34} = -0.282414 \cdot 10^{-3}$  на перемещение узла 1 в направлении осей  $x$  и  $y$  в первом случае загружения.

Расчёт прямым и комбинированным методами дал близкие значения. Чуть лучшую сходимость по времени счёта показал комбинированный метод, хотя значение целевой функции здесь на 1,8 % больше, чем в прямом методе. Для сравнительного анализа приведём график сходимости целевой функции на итерациях с разных начальных точек (см. рис. 5).

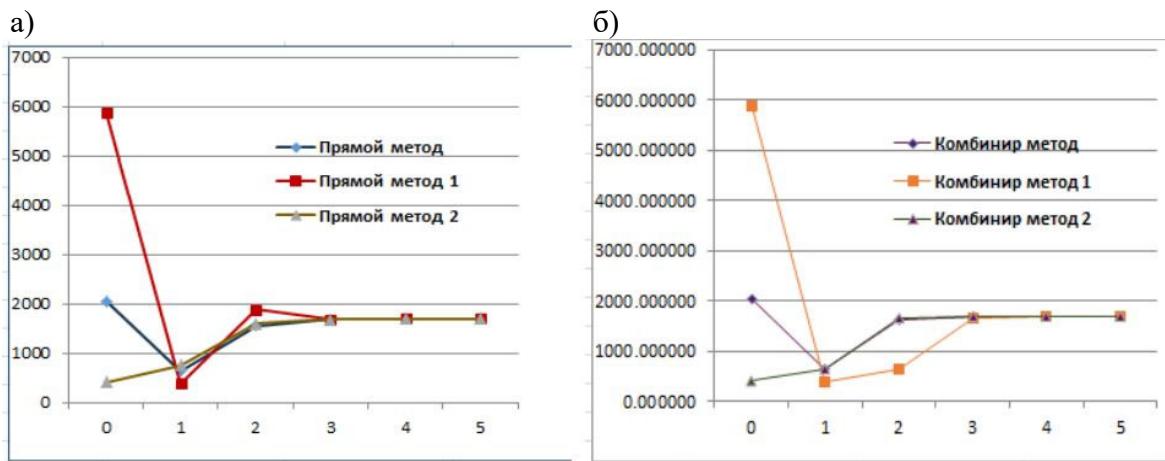


Рис. 5. Графики сходимости на итерациях: а – метод прямого поиска; б – комбинированный метод

Покажем таблицу, где даётся сравнение с результатами других авторов (см. табл. 3).

Таблица 3  
Сравнение полученных результатов оптимизации

| Группы элементов                  | Площади элементов, входящих в группу | Длины элементов, м  | Оптимальная площадь поперечного сечения элементов группы, см <sup>2</sup> |                        |                       |                       |
|-----------------------------------|--------------------------------------|---------------------|---|------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                   |                                      |                     | CONAP [23]  | GAOS [24]              | ОКАГЭ<br>Прямой метод | Комбинированный метод |
| 1                                 | A <sub>1</sub> :A <sub>4</sub>       | 1.5240              | 1.0110  | 1.000                  | 1.009 546 970 4       | 1.010 268 66          |
| 2                                 | A <sub>5</sub> :A <sub>12</sub>      | 3.4078              | 3.4654  | 3.5352                 | 3.521 152 880 8       | 3.522 094 77          |
| 3                                 | A <sub>13</sub> :A <sub>16</sub>     | 3.0480              | 2.6808  | 3.0976                 | 2.648 765 901 6       | 2.649 461 08          |
| 4                                 | A <sub>17</sub> :A <sub>18</sub>     | 4.3105              | 3.6822  | 3.3557                 | 3.676 894 286         | 3.678 083 65          |
| 5                                 | A <sub>19</sub> :A <sub>22</sub>     | 1.5240              | 3.4122  | 2.9679                 | 3.379 412 695 8       | 3.380 509 93          |
| 6                                 | A <sub>23</sub> :A <sub>30</sub>     | 3.4078              | 3.3066  | 3.4196                 | 3.337 245 600 3       | 3.338 309 05          |
| 7                                 | A <sub>31</sub> :A <sub>34</sub>     | 3.0480              | 0.645 16  | 0.7752                 | 0.645 16              | 0.645 16              |
| 8                                 | A <sub>35</sub> :A <sub>36</sub>     | 4.3105              | 0.645 16  | 1.0646                 | 0.645 16              | 0.645 16              |
| 9                                 | A <sub>37</sub> :A <sub>40</sub>     | 1.5240              | 8.1818  | 7.4521                 | 8.185 712 131 4       | 8.188 504 24          |
| 10                                | A <sub>41</sub> :A <sub>48</sub>     | 3.4078              | 3.2983  | 3.7751                 | 3.302 064 087 7       | 3.303 069 7           |
| 11                                | A <sub>49</sub> :A <sub>52</sub>     | 3.0480              | 0.645 16  | 0.645 16               | 0.645 16              | 0.645 16              |
| 12                                | A <sub>53</sub> :A <sub>54</sub>     | 4.3105              | 0.645 16  | 0.645 16               | 0.645 16              | 0.645 16              |
| 13                                | A <sub>55</sub> :A <sub>58</sub>     | 1.5240              | 12.4304   | 11.3239                | 12.173 044 623        | 12.177 055 81         |
| 14                                | A <sub>59</sub> :A <sub>66</sub>     | 3.4078              | 3.3124  | 3.2583                 | 3.306 293 90          | 3.307 270 45          |
| 15                                | A <sub>67</sub> :A <sub>70</sub>     | 3.0480              | 0.645 16  | 0.6775                 | 0.645 16              | 0.645 16              |
| 16                                | A <sub>71</sub> :A <sub>72</sub>     | 4.3105              | 0.645 16  | 1.0007                 | 0.645 16              | 0.645 16              |
| Число итераций                    |                                      | 22                  | 14  | 5                      | 5                     |                       |
| Число обращений к целевой функции |                                      | -                   | -   | 50 546                 | 47 410                |                       |
| Оптимальный вес, Н                |                                      | 1858.657<br>(100 %) | 1923.760<br>(103.5 %)   | 1689.1328<br>(90.88 %) | 1689.62<br>(90.9 %)   |                       |
| Время счёта                       |                                      | -                   | -   | 340 с                  | 305 с                 |                       |

При сравнении с двумя другими источниками получены лучшие результаты по весу оптимальной конструкции и по числу итераций, что говорит об эффективности предложенных алгоритмов и работы ПК «ОКАГЭ» в целом.

**Основные выводы:**

1. ПК «ОКАГЭ» позволяет решать задачи оптимизации стальных каркасов с подбором типов и размеров сечений при минимизации расхода материала.

2. Модуль «Подготовка данных» позволяет проверить геометрические и физические параметры конструкции перед сохранением в текстовый файл. В блоке статического КЭ-анализа реализован расчёт стальных рам и каркасов в статической постановке.

3. Существенное влияние на сходимость алгоритмов, заложенных в расчёте, оказывают параметры оптимизации, которые задаются пользователем согласно инструкции через модуль настройки либо принимаются по умолчанию.

4. Верификация разработанного ПК, проведённая на основе решения тестовой задачи, позволила говорить о высокой точности и достоверности результатов расчёта, а также о хорошей функциональности алгоритмов оптимизации, заложенных в данный ПК.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Sobieszczanski-Sobieski J. Multilevel structural optimization. Computer aided optimal design, NATO/ASI seminar. Vol. 3, 1986, p. 7-28.
2. Hernández S. Applications of design optimization in steel and concrete industry. In: Belegundu AD, Mistree F, editors. Optimization in industry. New York: ASME; 1998. p. 81-88.
3. Свентиков, А. А. Параметрическая оптимизация висячих конструкций / А. А. Свентиков // Современные методы статического и динамического расчёта сооружений и конструкций: сборник статей. – Воронеж: ВГАСУ, 1994. – Вып. 3. – С. 46-55.
4. Долганов, А. И. К вопросу об оптимизации строительных систем по критерию надёжности / А. И. Долганов, Э. Р. Данилов // Проблемы оптимального проектирования сооружений: сб. докладов III Всерос. семинара. В 2 т. Т. 1. – Новосибирск: НГАСУ, 2000. – С. 69-75.
5. Edward, J. H. Applied optimal design: mechanical and structural systems / J. Haug. Edward, S. A. Jasbir // Michigan: A Wiley-Interscience. – 1979. – 506 p.
6. Arora, J. S. Methods for optimization variables: a review / J. S. Arora and M. W. Huang, C. C. Hsieh // Structural Optimization. – 1994. – no. 8. – P. 69-85.
7. Алексеев, А. В. Метод структурно-параметрической оптимизации конструктивных систем на основе эволюционного моделирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / Алексеев Анатолий Викторович. – Брянск, 2006. – 173 с.
8. Maute, K. An interactive method for the selection of design criteria and the formulation of optimization problems in computer aided optimal design / K. Maute, M. Raulli // C& S. – V. 82. № 1. 2004. – P. 71-79.
9. Комаров, В. А. Система тестов для программ оптимизации конструкций / В. А. Комаров, А. В. Болдырев, В. А. Зарубин // Экстремальные задачи и их приложение: тезисы докладов межгосударственной науч. конф. – Нижний Новгород: ННГУ, 1992. – С. 60-67.
10. Методы расчёта и оптимизации строительных конструкций на ЭВМ // Труды ЦНИИСК им. Кучеренко / под. ред. Н. Н. Складнева. – М.: ЦНИИСК, 1990. – 210 с.
11. Hernández, S. Design optimization of steel portal frames / Santiago Hernández, Arturo N. Fontán, Juan C. Pérezza'n, Pablo Loscos // Advances in Engineering Software. – 2005. – Vol. 36. – P. 626-633.
12. Pramod, T. K. Optimization of steel portal frames using python programming / T. K. Pramod, K. K. Kiran // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2019. – Vol. 06, issue. 02. – P. 564-569.
13. Тухфатуллин, Б. А. Оптимизация плоских стальных рам с учётом требований норм проектирования / Б. А. Тухфатуллин, Л. Е. Путеева // Вестник ТГАСУ. – 2008. – № 3. – С. 171-174.
14. Ахмадалиев, М. Алгоритм расчёта статически неопределеных ферм на ЭЦВМ методом нелинейного программирования / М. Ахмадалиев // Известия АН. – 1967. – № 1. – С. 1-8.
15. Геммерлинг, Г. А. Система автоматизированного проектирования стальных конструкций / Г. А. Геммерлинг. – М.: Стройиздат, 1987. – 210 с.
16. Ольков, Я. И. Автоматизированное оптимальное проектирование пространственных металлических стержневых конструкций (ПМСК) с использованием алгоритмов структурной оптимизации / Я. И. Ольков, А. В. Андронников // Известия вузов. Строительство. – 2003. – № 12. – С. 8-13.



17. Алехин, В. Н. Оптимальное проектирование элементов стального каркаса зданий на основе генетического алгоритма / В. Н. Алехин, А. Б. Ханина // Проблемы оптимального проектирования сооружений: Всерос. конф. – Новосибирск: НГАСУ, 2008. – С. 26-31.
18. Духовный, М. А. Применение линейного программирования к решению одной задачи строительной механики / М. А. Духовный, Г. М. Михайличенко // Строительная механика и расчёт сооружений. – 1966. – № 2. – С. 12-20.
19. Алпатов, В. Ю. Оптимальное проектирование металлических структур: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Алпатов Вадим Юрьевич. – Самара, 2002. – 260 с.
20. Математическая модель процесса деформирования элементов, изготовленных из конструкционных материалов с использованием машинного обучения / Я. Ю. Григорьев [и др.] // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2022. – № I-1 (57). – С. 15-23.
21. Дмитриева, Т. Л. Разработка и тестирование численных алгоритмов решения условно экстремальных задач / Т. Л. Дмитриева, Х. Уламбаяр // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 59-72.
22. Дмитриева, Т. Л. Использование балок с гофростенкой в современном проектировании / Т. Л. Дмитриева, Х. Уламбаяр // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. – 2015. – № 4 (15). – С. 132-139.
23. Habibi AliReza. New Approximation Method for Structural Optimization // Journal of Computing in Civil Engineering. – 2012, Vol. 26, No. 2, March 1, p. 236-247.
24. Lee K. S. A new structural optimization method based on the harmony search algorithm / K. S Lee, Z. W. Geem // Computers and Structures 82(2004). P. 781-798.

Младова Т. А., Муллер Н. В., Неведомский А. Д., Младов А. С.  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ  
ВЫБРОСАМИ АВТОЗАПРАВОЧНЫХ СТАНЦИЙ

Младова Т. А., Муллер Н. В., Неведомский А. Д., Младов А. С.  
T. A. Mladova, N. V. Muller, A. D. Nevedomsky, A. S. Mladov

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ВЫБРОСАМИ АВТОЗАПРАВОЧНЫХ СТАНЦИЙ

### MODELING OF ENVIRONMENTAL POLLUTION PROCESSES BY GAS STATION EMISSIONS

**Младова Татьяна Александровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Кадастры и техносферная безопасность» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: vip.mladova@mail.ru.

**Tatyana A. Mladova** – PhD in Engineering, Associate Professor, Cadastre and Technosphere Safety Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: vip.mladova@mail.ru.

**Муллер Нина Васильевна** – кандидат технических наук, доцент, и. о. заведующего кафедрой «Кадастры и техносферная безопасность» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: only\_nina@mail.ru.

**Nina V. Muller** – PhD in Engineering, Associate Professor, Acting Head of Cadastre and Technosphere Safety Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). Email: only\_nina@mail.ru.

**Неведомский Артур Денисович** – магистрант кафедры «Кадастры и техносферная безопасность» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Artur D. Nevedomsky** – Master's Degree Student, Cadastre and Technosphere Safety Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Младов Алексей Сергеевич** – магистрант кафедры «Прикладная математика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Alexei S. Mladov** – Master's Degree Student, Applied Mathematics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** В статье проведены исследования и анализ выбросов вредных веществ в воздушную среду от автозаправочных станций (АЗС). В ходе исследования проанализированы зависимости валового выброса от мощности АЗС, сформированы расчётные модели. Предложены методы измерения загрязнения атмосферного воздуха при работе стационарных заправочных станций. Применительно к АЗС предложенная методика и модель помогут показать степень целесообразности строительства станции на выбранном участке, выявить плюсы и минусы.

**Summary.** The article studies and analyzes emissions of harmful substances into the air from gas stations. In the course of the study, the dependences of gross emissions on the capacity of gas stations were analyzed and calculation models were formed. The methods of solving atmospheric air pollution during the operation of stationary gas stations are proposed. With regard to gas stations, the proposed methodology and model will help to show the degree of expediency of building a station on the selected site, to identify the pros and cons.

**Ключевые слова:** АЗС, загрязнение окружающей природной среды, выбросы нефтепродуктов, экономический ущерб.

**Key words:** Gas stations, environmental pollution, oil product emissions, economic damage.

УДК 504.054

Проблема загрязнения окружающей среды приобрела особую остроту в современный период, характеризующийся высокими темпами роста производительных сил. Одним из наиболее распространённых источников загрязнения окружающей среды являются моторные транспортные

средства и предприятия по их обслуживанию. Стационарные и передвижные автомобильные средства доставки нефтепродуктов и сжиженного газа также стали источниками загрязнения водного и воздушного бассейнов.

Негативное влияние этих газов на окружающую среду проявляется в большей степени в крупных городах с высокой плотностью застройки и значительной концентрацией автотранспорта, причём потенциальная опасность этого влияния всё возрастает.

Вопросам влияния автозаправочных станций и автомобильных средств на окружающую среду и разработке методов её защиты уделяется значительное внимание в нашей стране и за рубежом.

Происходящие изменения в структуре и составе автомобильного парка и потребляемых им нефтепродуктах, а также быстрый рост автомобильных перевозок по стране вызывают необходимость в совершенствовании, развитии и специализации автозаправочных станций с учётом специфических условий эксплуатации и требований к заправке каждой группы автотранспорта.

В статье рассмотрены АЗС, расположенные на улицах Орловской, Дзержинского, Кирова, перекрёстке улиц Вокзальная – Димитрова, п. Майский (см. рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения АЗС

Ближайшие жилые дома для всех автозаправочных станций находятся на расстоянии более 300 м от площадок АЗС.

Проектируемые АЗС предназначены для заправки топливом легкового и грузового транспорта. Для этой цели на АЗС предусмотрена возможность хранения и раздачи трёх сортов неэтилированного бензина (АИ-92, АИ-95, АИ-98) и дизельного топлива. Значения существующих фоновых концентраций в районе проектируемой АЗС приняты в соответствии с письмом Росгидромета от 16 августа 2018 г. № 20-44/282 «О направлении временных рекомендаций “Фоновые концентрации вредных (загрязняющих) веществ на период с 2019 по 2023 гг.”».

Согласно приведённым значениям, фоновые концентрации по всем загрязняющим веществам в районе расчётной площадки не превышают значений 1,0 ПДК.

При анализе степени возможного загрязнения атмосферного воздуха жилой зоны выбросами проектируемой АЗС фоновые концентрации должны учитываться в сумме с расчётными значениями для веществ, приземные концентрации которых в жилой зоне превышают значение 0,10 ПДК.

Основными источниками загрязнения окружающей среды являются выбросы загрязняющих веществ от проектируемой АЗС, образующиеся в результате хранения автомобильного топ-

лива, слива топлива в резервуары и налива топлива в баки автомашин; работы двигателей автотранспорта во время въезда на территорию АЗС для заправки и выезда с территории.

Источниками выделения газовоздушной смеси являются:

- резервуары с топливом при закачке и хранении;
- баки автомашин при заправке с топливораздаточных колонок;
- двигатели автотранспорта.

Источниками выбросов вредных веществ в атмосферный воздух являются:

- дыхательные клапаны резервуаров;
- топливные баки автомашин;
- выхлопные трубы автотранспорта.

Аварийные выбросы в атмосферу при эксплуатации АЗС отсутствуют.

Имеют место технологически предусмотренные залповые выбросы: в резервуарах с нефтепродуктами при загрузке; выброс углеводородов из дыхательного клапана резервуара.

Проведено исследование зависимости валового выброса выбрасываемых веществ от мощности станций.

Общий предполагаемый расход бензина и дизельного топлива на всех автозаправочных станциях представлен на рис. 2.

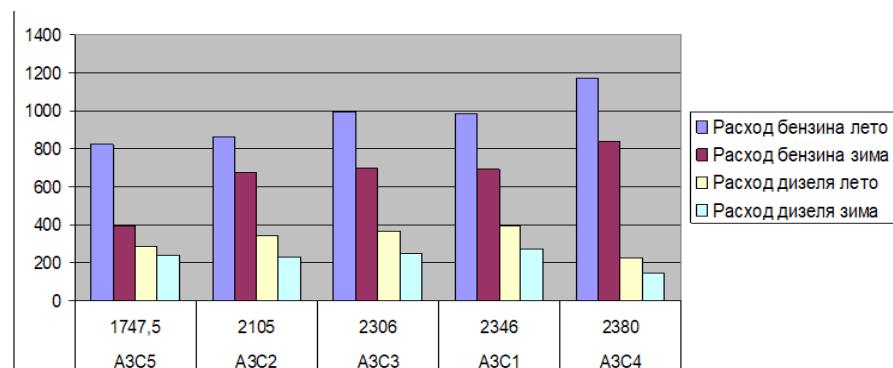


Рис. 2. Расход топлива на автозаправочных станциях

На рис. 2 видно, что наибольшую мощность будет иметь автозаправочная станция 1, которая находится на ул. Орловской при выезде из города, из-за высокой плотности автотранспорта.

Были смоделированы зависимости выброса вредных веществ в атмосферный воздух от мощности расхода топлива на станциях (см. рис. 3).

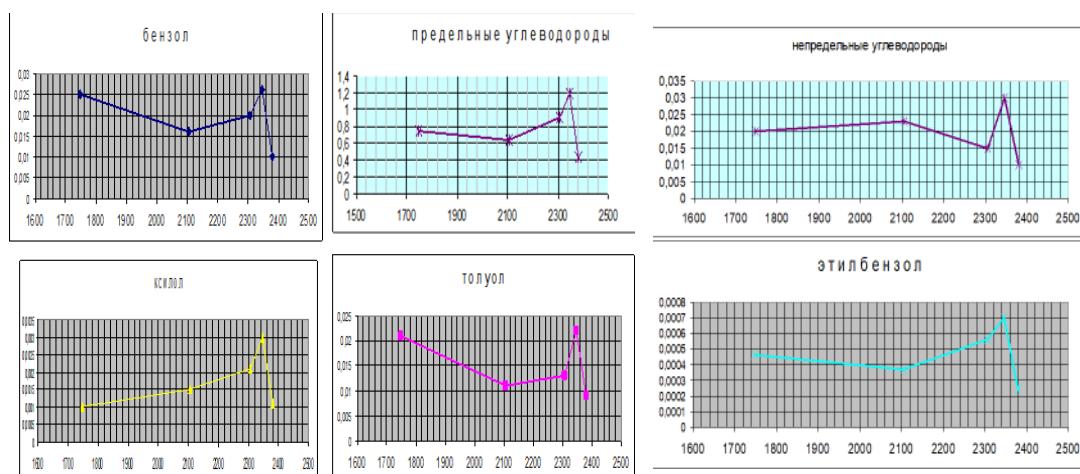


Рис. 3. Выбросы вредных веществ в атмосферу

Из графиков видно, что по мере увеличения мощности выбросы растут, а при наибольшей мощности выбросы вредных веществ на АЗС 1 самые низкие.

Оценивая графики, мы можем исследовать линейную зависимость, т. е. выбросы веществ имеют линейную связь с мощностью АЗС. Воспользуемся простой линейной регрессией и применим метод наименьших квадратов в выборочной совокупности для идентификации наилучшей модели:

|   |   |
|---|---|
| – Бензол                                | $f(x) = 0,042 - 1,042 \cdot 10^{-5}t;$                |
| – Толуол                                | $f(x) = 0,036 - 9,353 \cdot 10^{-6}t;$                |
| – Ксиол                                 | $f(x) = -1,923 \cdot 10^{-3} + 1,683 \cdot 10^{-6}t;$ |
| – Этилбензол                            | $f(x) = 3,455 \cdot 10^{-4} + 5,536 \cdot 10^{-8}t;$  |
| – Предельные углеводороды С1-С5, С5-С10 | $f(x) = 0,47 + 1,43 \cdot 10^{-4}t;$                  |
| – Непредельные углеводороды             | $f(x) = 0,029 - 4,35 \cdot 10^{-6}t.$                 |

При проектировании АЗС по выведенным формулам можно рассчитать количество вредных веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух, и оценить влияние выбросов на ближайшие селитебные зоны.

Произведём оценку потерь нефтепродуктов. При повышении температуры окружающей среды жидкости нагреваются и, как следствие, увеличиваются в объёме. Согласно п. 3.4 ГОСТ Р 8.563-2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений» автоцистерна является мерой полной вместимости. В качестве методической основы послужил документ МИ 2632-2021 «Рекомендация. Государственная система обеспечения единства измерений. Плотность нефти и нефтепродуктов и коэффициенты объёмного расширения и сжимаемости. Методы и программа расчёта» [4].

На основе фактических данных для каждого из шести основных видов нефтепродуктов были найдены их средние плотности при температуре  $-15^{\circ}\text{C}$ . Полученные результаты обобщены в табл. 1.

Таблица 1  
Результаты расчётов

| Показатель  | Нефтепродукты |         |         |         |                   |         |
|---|---------------|---------|---------|---------|-------------------|---------|
|   | Бензины       |         |         |         | Дизельное топливо |         |
|   | А-76 З        | А-76 Л  | А-92    | А-95    | ДТ З              | ДТ Л    |
| Средняя плотность при $+15^{\circ}\text{C}$ , г/см <sup>3</sup> | 0,72227       | 0,73833 | 0,76618 | 0,76415 | 0,82010           | 0,82999 |
| Среднеквадратическое отклонение, г/см <sup>3</sup>              | 0,00376       | 0,00569 | 0,00469 | 0,00783 | 0,00605           | 0,00351 |
| Коэффициент вариации, %   | 0,52          | 0,77    | 0,61    | 1,02    | 0,74              | 0,42    |

Затем на интервале температур, характерных для Дальнего Востока (от  $-40$  до  $+35^{\circ}\text{C}$  (для бензинов) и до  $+42^{\circ}\text{C}$  (для дизельного топлива) [3]), были найдены расчётные плотности, соответствующие той или иной температуре.

Так, для плотностей при различных температурах легко найти линейные уравнения трендов, если использовать стандартный пакет анализа MS Excel. Точность аппроксимации  $R^2$  оказалась почти 100%-й. Результаты полученных расчётов занесены в табл. 2.

Постоянные коэффициенты перед аргументом в функциях показывают, на сколько миллилитров изменится объём 1 литра нефтепродукта при изменении его температуры на  $1^{\circ}\text{C}$ .

Как видим, результаты по всем трём источникам довольно близки (см. табл. 3), но можно отметить, что ГОСТ Р 8.563-2009 и ГОСТ 58404-2019 выдают не совсем стабильные результаты. А потому в практической работе предпочтение следует отдавать всё же Р 50.2.040-2004 [4; 5; 6].

Таблица 2

Результаты расчёта значений аппроксимирующей функции

| Показатель | Уравнение трендов               | Аппроксимация     |
|------------|---------------------------------|-------------------|
| ДТ Л       | $\rho(t) = -0,00071t + 0,84065$ | $R^2 = 99,996 \%$ |
| ДТ З       | $\rho(t) = -0,00072t + 0,83082$ | $R^2 = 99,996 \%$ |
| А-92       | $\rho(t) = -0,00088t + 0,77926$ | $R^2 = 99,994 \%$ |
| А-95       | $\rho(t) = -0,00088t + 0,77729$ | $R^2 = 99,994 \%$ |
| А-98       | $\rho(t) = -0,00089t + 0,75189$ | $R^2 = 99,993 \%$ |

Таблица 3

Результаты расчётов

| Показатель   | Нефтепродукты |      |      |                   |      |
|--|---------------|------|------|-------------------|------|
|  | Бензины       |      |      | Дизельное топливо |      |
|  | А-92          | А-95 | А-98 | ДТ З              | ДТ Л |
| Изменение объёма нефтепродукта при изменении температуры на 1 °C в расчёте на 1000 л |               |      |      |                   |      |
| Согласно Р 50.2.040-2004, л  | 0,88          | 0,88 | 0,88 | 0,72              | 0,71 |
| Справочные данные  |               |      |      |                   |      |
| Согласно ГОСТ Р 8.563-2009, л  | 0,76          | 0,76 | 0,80 | 0,69              | 0,67 |
| Согласно ГОСТ 58404-2019, л  | 0,83          | 0,83 | 0,86 | 0,76              | 0,74 |

На основании проведённых исследований был произведён расчёт с наливного пункта на АЗС. Примем, что отгружен наиболее часто используемый бензин А-92 при температуре +17 °C, при этом указанный в товарно-транспортной накладной объём – 16 720 л – равен объёму автоцистерны согласно свидетельству о поверке.

По формуле объёма цилиндра найдём уменьшение номинального объёма продукта в горловине (с переводом в литры):

$$V_{\text{Ц}} = \frac{\pi d^2 h}{4} \times 10^{-6},$$

$$V_{\text{Ц}} = \frac{3,14 \cdot (900\text{мм})^2 \times 15\text{мм}}{4} \times 10^{-6} = 9,5 \text{ л.}$$

Используем коэффициент температурной сжимаемости бензина А-92; изменение объёма вследствие роста температуры продукта в цистерне в соответствии с Р 50.2.040-2004 составит 88,3 л.

Поскольку изменения носят характер, противоположный ожидаемому, то  $9,5 + 88,3 \approx 98$  л, или почти пять 20-литровых канистр.

На основании вышеизложенного можно предположить, что будут произведены неучтённые переливы нефтепродуктов, что приведёт к дополнительному загрязнению окружающей среды.

Рекомендуется определять объём утраченного нефтепродукта в автоцистерне при каждой приёмке на АЗС согласно предложенной методике по Р 50.2.040-2004.

Проведённые исследования автозаправочных станций показали необходимость системного подхода при проектировании АЗС как любого промышленного объекта, расположенного в месте проживания населения [1; 2; 7].

Данный объект характеризуется рядом факторов, которые в данном случае целесообразно разбить на три группы:

1. оказание услуг населению (заправка автомашин топливом, кафе, магазин и т. д.), отчисление налогов в регион размещения и т. п.;

2. возможное ухудшение экологической обстановки, в том числе отражающееся на здоровье населения;

3. повышенная потенциальная опасность (взрывы топлива, угроза террористических актов и т. п.).

Таким образом, существует ряд противоречивых факторов, как положительных, так и отрицательных, с точки зрения размещения АЗС.

Применительно к АЗС предложенная методика и модель помогут показать степень целесообразности строительства станции на выбранном участке, выявить все плюсы и минусы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колесникова, О. В. Влияние серийности на стратегию комплексной автоматизации управления машиностроительным производством / О. В. Колесникова, И. С. Рупинец // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V-1 (53). – С. 38-46.
2. Кравченко, Е. Г. Оценка качества технологических процессов машиностроительных производств / Е. Г. Кравченко, Т. А. Отряскина, А. А. Шершнёв // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № VII-1 (55). – С. 79-87.
3. Теоретическая оценка величины отклонения разности между минимальным и максимальным значениями температуры окружающей среды / В. А. Челухин, М. А. Кружаев, П'єй Зон Аунг, Е. В. Абрамсон // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № III-1 (43). – С. 81-93.
4. ГОСТ Р 8.563-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики (методы) измерений = State system for ensuring the uniformity of measurements. Procedures of measurements: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 декабря 2009 г. № 1253-ст: замен ГОСТ Р 8.563.96: дата введения 2010-04-15 / подготовлен Федеральным государственным унитарным предприятием «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы» (ФГУП «ВНИИМС»). – М.: Стандартинформ, 2023. – 20 с.
5. Р 50.2.040-2004. Рекомендации по метрологии. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение учёта нефти при её транспортировке по системе магистральных нефтепроводов. Основные положения: принятые и введены в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 декабря 2004 г. № 125-ст: замен Инструкции по учёту нефти при её транспортировке по системе магистральных нефтепроводов ОАО АК «Транснефть»: дата введения 2005-01-01 / разработаны Федеральным государственным унитарным предприятием Всероссийский научно-исследовательский институт расходометрии (ФГУП ВНИИР). – М.: Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2004. – 70 с.
6. ГОСТ 58404-2019. Станции и комплексы автозаправочные. Правила технической эксплуатации = Petrol filling stations and complexes. Rules of technical operations: Национальный стандарт Российской Федерации: утверждён и введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 25 апреля 2019 г. № 167-ст: введён впервые: дата введения 2019-06-01 / разработан Публичным акционерным обществом «Нефтяная компания “Роснефть”» (ПАО «НК “Роснефть”»). – М.: Стандартинформ, 2023. – 53 с.
7. Бондарь, В. А. Операции с нефтепродуктами. Автозаправочные станции / В. А. Бондарь, Е. И. Зоря, Д. В. Цагарелли. – М.: ООО «Паритет Граф», 2000. – 407 с.

Носков С. И.

S. I. Noskov

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОСТОЙ ФОРМЫ ВЛОЖЕННОЙ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ

### PARAMETER IDENTIFICATION OF THE SIMPLE FORM OF A NESTED PIECEWISE LINEAR REGRESSION

**Носков Сергей Иванович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные системы и защита информации» Иркутского государственного университета путей сообщения (Россия, Иркутск); Россия, 664074, ул. Чернышевского, д. 15; тел. 8(914)902-24-94. E-mail: sergey.noskov.57@mail.ru.

**Sergey I. Noskov** – Doctor of Engineering, Professor, Information Systems and Information Protection Department, Irkutsk State University of Railway Transport (Russia, Irkutsk); Russia, 664074, st. Chernyshevsky, 15; tel. 8(914)902-24-94. E-mail: sergey.noskov.57@mail.ru.

**Аннотация.** В работе на основе прошлых публикаций автора показано, что задача идентификации параметров простой формы вложенной кусочно-линейной регрессионной модели с использованием метода наименьших модулей может быть сведена к задаче линейно-булевого программирования приемлемой для практических проблем размерности. Решён простой численный пример.

**Summary.** Based on the author's previous publications, the paper shows that the problem of identifying the parameters of a simple form of a nested piecewise linear regression model using the method of least modules can be reduced to a linear Boolean programming problem of dimension acceptable for practical problems. A simple numerical example has been solved.

**Ключевые слова:** кусочно-линейная регрессия, функция риска, оценивание параметров, вложенная кусочно-линейная модель, метод наименьших модулей.

**Key words:** piecewise linear regression, risk function, parameter estimation, nested piecewise linear model, method of least modules.

УДК 330.4

**Введение.** Методы регрессионного анализа широко применяются для исследования различных объектов. При этом используются как обычные, гладкие модельные связи, так и различные негладкие конструкции. Так, в работе [1] разработан новый метод оценки адекватности функции гладкой регрессии на основе непараметрической регрессии и бутстреп-подхода. Он позволяет пользователям выявлять систематические несоответствия в расчётных и модельных траекториях и проверять различные гипотезы. Рассчитываются доверительные интервалы для оценок непараметрической регрессии, если описываемая функция адекватна, что позволяет выявлять контуры возможного несоответствия. В работе [2] с помощью модели регрессии плавного перехода исследуется нелинейная зависимость между размером внешнего долга и экономическим ростом в Иране и Малайзии за период 1973-2017 гг. В работе [3] предлагается использовать кусочно-линейную модель прогрессивной шкалы налогообложения. Продемонстрированы преимущества предложенной модели налогообложения по сравнению с «плоской» шкалой. Кусочно-линейная шкала позволит налогоплательщикам легче перейти на прогрессивную налоговую ставку. Для оценки действенности предлагаемого варианта налогообложения разработана экономико-математическая модель, предполагающая освобождение от налога лиц с доходами ниже прожиточного минимума и увеличение ставки налога по сравнению с действующим для лиц с повышенными доходами. В работе [4] разрабатывается достаточно гладкая функция регрессии с использованием метода ядра при выборе переменных для регрессионной модели. При этом вычислительная процедура не содержит понятия регуляризации. Работа [5] посвящена оцениванию параметров гладкой регрессии в классе



условно параметрических моделей ковариантных откликов. В работе [6] рассмотрена задача идентификации неизвестных нестационарных кусочно-линейных параметров для линейной регрессионной модели. В статье [7] рассматривается метод кусочно-линейного нечёткого регрессионного анализа.

**Оценивание параметров некоторых кусочно-линейных регрессий.** В работах [8–11] приводятся алгоритмы решения задач оценивания неизвестных параметров двух негладких регрессионных зависимостей.

### 1. Кусочно-линейная регрессия вида

$$y_k = \min \{ \alpha_1 x_{k1}, \alpha_2 x_{k2}, \dots, \alpha_m x_{km} \} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где  $x_i$ ,  $y$  – соответственно входные (независимые) и выходная (зависимая) переменные, значения которых известны;  $\alpha_i$ ,  $i = \overline{1, m}$  – подлежащие оцениванию параметры;  $\varepsilon_k$  – ошибки аппроксимации;  $n$  – длина выборки данных. Без потери общности будем предполагать неотрицательность всех переменных модели (1).

В работе [8] показано, что задача идентификации параметров  $\alpha_i$ ,  $i = \overline{1, m}$  зависимости (1) с использованием метода наименьших модулей (МНМ) [12]

$$\sum_{k=1}^n |\varepsilon_k| \rightarrow \min \quad (2)$$

сводится к следующей задаче линейно-булевого программирования (ЛБП):

$$z_k + u_k - v_k = y_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (3)$$

$$z_k \leq \alpha_i x_{ki}, \quad k = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (4)$$

$$\alpha_i x_{ki} - z_k \leq (1 - \sigma_{ki})M, \quad k = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^m \sigma_{ki} = 1, \quad k = \overline{1, n}, \quad (6)$$

$$u_k \geq 0, \quad v_k \geq 0, \quad z_k \geq 0, \quad k = \overline{1, n}, \quad (7)$$

$$\sigma_{ki} \in \{0, 1\}, \quad k = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (8)$$

$$\sum_{k=1}^n (u_k + v_k) \rightarrow \min, \quad (9)$$

где  $M$  – заданное большое положительное число.

Таким образом, задача (2) поиска значений неизвестных параметров  $\alpha_i$ ,  $i = \overline{1, m}$  кусочно-линейной регрессии (1) с помощью МНМ сводится к задаче ЛБП (3) – (9) с  $mn + 3n + m$  переменными (из которых  $mn$  – булевые) и  $2(mn + n)$  ограничениями.

Кусочно-линейная модель (1) применяется при исследовании технических, социально-экономических и других систем, когда необходимо отразить то обстоятельство, что увеличение значения выходной переменной невозможно без пропорционального увеличения значений входных факторов (см., например [13]).

### 2. Функция риска вида

$$y_k = \max \{ \alpha_1 x_{k1}, \alpha_2 x_{k2}, \dots, \alpha_m x_{km} \} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n}. \quad (10)$$

Она применяется тогда, когда необходимо формализовать возможность уменьшения значения выходной переменной только при пропорциональном уменьшении значений входных показателей (см., например [10; 14]).

Задача оценивания параметров  $\alpha_i$ ,  $i = \overline{1, m}$  зависимости (10) с использованием метода наименьших модулей также сводится к задаче ЛБП (3) – (5), (6) – (8), (9) после замены ограничений (4), (5) на следующие [11]:

$$z_k \geq \alpha_i x_{ki}, \quad k = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, m}, \quad (11)$$

$$\alpha_i x_{ki} - z_k \geq (\sigma_{ki} - 1)M, \quad k = \overline{1, n}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (12)$$

**Вычисление оценок параметров простой формы вложенной кусочно-линейной модели.** В работе [15] предложены вложенные кусочно-линейные регрессионные зависимости первого и второго типов:

$$\begin{aligned} y_k &= \min \{ \min_{i \in I^1} \{ \alpha_i^1 x_{ki} \}, \dots, \min_{i \in I^G} \{ \alpha_i^G x_{ki} \}, \\ &\quad \max_{i \in J^1} \{ \beta_i^1 x_{ki} \}, \dots, \max_{i \in J^H} \{ \beta_i^H x_{ki} \} \} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n} \end{aligned} \quad (13)$$

и

$$\begin{aligned} y_k &= \max \{ \min_{i \in I^1} \{ \alpha_i^1 x_{ki} \}, \dots, \min_{i \in I^G} \{ \alpha_i^G x_{ki} \}, \\ &\quad \max_{i \in J^1} \{ \beta_i^1 x_{ki} \}, \dots, \max_{i \in J^H} \{ \beta_i^H x_{ki} \} \} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n}, \end{aligned} \quad (14)$$

где индексные множества  $I^i, i = \overline{1, G}$ ,  $J^i, i = \overline{1, H}$  являются подмножествами множества  $\{1, 2, \dots, m\}$  и могут (однако не обязательно должны) иметь непустые всевозможные попарные пересечения.

Поставим задачу оценивания неизвестных параметров простой формы вложенной кусочно-линейной модели первого типа:

$$y_k = \min \{ \min_{i \in I} \{ \alpha_i x_{ki} \}, \max_{i \in J} \{ \beta_i x_{ki} \} \} + \varepsilon_k, \quad k = \overline{1, n} \quad (15)$$

с использованием метода наименьших модулей. Воспользуемся для этого описанным выше подходом, применённым для идентификации параметров кусочно-линейных моделей (1) и (10).

Отметим, что в настоящей работе мы не рассматриваем вопросы интерпретации вложенных кусочно-линейных моделей (13) – (15).

Введём следующие обозначения:

$$h_k = \min_{i \in I} \{ \alpha_i x_{ki} \}, \quad k = \overline{1, n},$$

$$g_k = \max_{i \in J} \{ \beta_i x_{ki} \}, \quad k = \overline{1, n},$$

$$t_k = \min (h_k, g_k), \quad k = \overline{1, n}.$$

Тогда задача оценивания параметров  $\alpha_i, i \in I$ ,  $\beta_i, i \in J$ , по аналогии с задачами (3) – (9) и (3), (6) – (8), (11), (12), (9), сводится к следующей задаче ЛБП:

$$h_k \leq \alpha_i x_{ki}, \quad k = \overline{1, n}, \quad i \in I, \quad (16)$$

$$\alpha_i x_{ki} - h_k \leq (1 - s_{ki})M, \quad k = \overline{1, n}, \quad i \in I, \quad (17)$$

$$\sum_{i \in I} s_{ki} = 1, \quad k = \overline{1, n}, \quad (18)$$

$$g_k \geq \beta_i x_{ki}, \quad k = \overline{1, n}, \quad i \in J, \quad (19)$$



$$\beta_i x_{ki} - g_k \geq (p_{ki} - 1)M, \quad k = \overline{1, n}, \quad i \in J, \quad (20)$$

$$\sum_{i \in J} p_{ki} = 1, \quad k = \overline{1, n}, \quad (21)$$

$$t_k \leq h_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (22)$$

$$t_k \leq g_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (23)$$

$$h_k - t_k + Mr_k \leq M, \quad k = \overline{1, n}, \quad (24)$$

$$g_k - t_k - Mr_k \leq 0, \quad k = \overline{1, n}, \quad (25)$$

$$t_k + u_k - v_k = y_k, \quad k = \overline{1, n}, \quad (26)$$

$$u_k \geq 0, v_k \geq 0, h_k \geq 0, g_k \geq 0, t_k \geq 0, k = \overline{1, n}, \quad (27)$$

$$s_{ki} \in \{0, 1\}, \quad k = \overline{1, n}, \quad i \in I, \quad (28)$$

$$p_{ki} \in \{0, 1\}, \quad k = \overline{1, n}, \quad i \in J, \quad (29)$$

$$r_k \in \{0, 1\}, \quad k = \overline{1, n}, \quad (30)$$

$$\sum_{k=1}^n (u_k + v_k) \rightarrow \min. \quad (31)$$

**Пример.** Пусть задана следующая выборка данных:

$$X = \begin{pmatrix} 2 & 4 & 3 \\ 7 & 1 & 9 \\ 6 & 5 & 8 \\ 3 & 8 & 4 \end{pmatrix}, \quad y = \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \\ 2 \\ 9 \end{pmatrix}.$$

Поставим задачу построения простой формы вложенной кусочно-линейной регрессии первого типа с индексными множествами  $I$  и  $J$ , равными

$$I = \{1, 2\}, \quad J = \{2, 3\}.$$

В результате решения задачи ЛБП (16) – (31) получим следующую модель:

$$y_k = \min \{ \min \{2x_{k1}, 4x_{k2}\}, \max \{0.75x_{k2}, 0.468x_{k3}\} + \varepsilon_k \}, \quad k = \overline{1, 4},$$

при этом вещественные переменные задачи примут значения

$$h = (4, 4, 12, 6),$$

$$g = (3, 4.218, 3.75, 6),$$

$$t = (3, 4, 3.75, 6),$$

$$u = (0, 0, 0, 3),$$

$$v = (0, 0, 1.75, 0).$$

Вызывает интерес исследование сформулированной в работе задачи для интервально заданной выборки с применением соответствующих методов (см., например, [16–18]), а также по-

пытались применить предложенные автором вложенные кусочно-линейные регрессии для анализа минимаксных задач управления риском в сложных производственных системах [19].

**Выводы.** В работе задача идентификации параметров простой формы вложенной кусочно-линейной регрессионной модели с использованием метода наименьших модулей сведена к задаче линейно-булевого программирования. Решён численный пример.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Brown S., Heathcote A. On the Use of Nonparametric Regression in Assessing Parametric Regression Models December // Journal of Mathematical Psychology. – 2002. – № 46 (6). – P. 716-730.
2. Shoorekchal M., Eltejaei E. External debt and economic growth in Iran and Malaysia: A smooth transition regression model // Iranian Economic Review. – 2021. – № 25 (2). – P. 323-335.
3. Mkhitaryan V. S., Shishov V. F., Iskorkin D. V. On the Analysis of the Efficiency of a Piecewise-Linear Model for Progressive // Voprosy Statistiki. – 2020. – № 27 (6). – P. 79-85.
4. Ikeda S., Sato Y. Kernel methods for regression model based on variable selection // International Journal of Knowledge Engineering and Soft Data Paradigms. – 2009. – № 1 (1). – P. 49-62.
5. Pal J., Banerjee M. Estimation of smooth regression functions in monotone response models // Journal of Statistical Planning and Inference. – 2008. – № 138 (10). – P. 3125-3143.
6. Идентификация кусочно-линейных параметров регрессионных моделей нестационарных детерминированных систем / В. Цзянь, А. А. Бобцов, С. А. Колюбин, А. А. Пыркин, Л. В. Туан // Автоматика и телемеханика. – 2018. – № 12. – С. 71-82.
7. Изюмов, Б. Д. Кусочно-линейный нечёткий регрессионный анализ данных испытаний скважин / Б. Д. Изюмов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2013. – № 11. – С. 22-29.
8. Носков, С. И. Идентификация параметров кусочно-линейной регрессии / С. И. Носков, Р. В. Лоншаков // Информационные технологии и проблемы математического моделирования сложных систем. – 2008. – № 6. – С. 63-64.
9. Носков, С. И. Программный комплекс построения некоторых типов кусочно-линейных регрессий / С. И. Носков, А. А. Хоняков // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. – 2019. – № 3 (4). – С. 47-55.
10. Носков, С. И. Применение функции риска для моделирования экономических систем / С. И. Носков, А. А. Хоняков // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 5 (33). – С. 85-92.
11. Носков, С. И. Идентификация параметров кусочно-линейной функции риска / С. И. Носков // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. – 2017. – Т. 1. – С. 417-421.
12. Носков, С. И. О методе смешанного оценивания параметров линейной регрессии / С. И. Носков // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. – 2019. – № 1 (2). – С. 41-45.
13. Носков, С. И. Анализ динамики отдачи от показателей в производственной функции с постоянными пропорциями / С. И. Носков // Вестник СамГУПС. – 2022. – № 4 (58). – С. 109-113.
14. Носков, С. И. Применение функции риска для модельного описания колебания цен на рынке недвижимости / С. И. Носков, А. А. Хоняков // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2021. – № 3 (37). – С. 77-82.
15. Носков, С. И. Подход к формализации вложенной кусочно-линейной регрессии / С. И. Носков // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2023. – № 1-2 (76). – С. 218-220.
16. Kreinovich V., Lakeyev A. V., Noskov S. I. Approximate linear algebra is intractable // Linear Algebra and its Applications. – 1996. – Т. 232. – № 1-3. – С. 45-54.
17. Lakeyev A. V., Noskov S. I. A description of the set of solutions of a linear equation with intervally defined operator and right-hand side // Doklady Mathematics. – 1993. – Т. 47. № 3. – Р. 518-523.
18. Носков, С. И. Точечная характеристика множеств решений интервальных систем линейных алгебраических уравнений / С. И. Носков // Информационные технологии и математическое моделирование в управлении сложными системами. – 2018. – № 1. – С. 8-13.
19. Золотова, Т. В. Линейные минимаксные задачи управления риском в сложных производственных системах / Т. В. Золотова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2010. – № II-1 (2). – С. 8-13.



Черный С. П., Емельянов К. А., Духнов Н. Н., Сотников И. А., Годяев А. И.  
S. P. Chernii, K. A. Emelyanov, N. N. Dukhnov, I. A. Sotnikov, A. I. Godyaev

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТОЙ НЕЧЁТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСВЯЗНЫМ ОБЪЕКТОМ В УСЛОВИЯХ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОСТИ

## MODELING OF A DEVELOPED FUZZY CONTROL SYSTEM FOR A MULTI-CONNECTED OBJECT UNDER CONDITIONS OF MULTICRITERIALITY

**Черный Сергей Петрович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keparu@knastu.ru.

**Sergej P. Chernii** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keparu@knastu.ru.

**Емельянов Кирилл Андреевич** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: eparu@knastu.ru.

**Kirill A. Emelyanov** – Postgraduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: eparu@knastu.ru.

**Духнов Николай Николаевич** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: eparu@knastu.ru.

**Nikolai N. Dukhnov** – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: eparu@knastu.ru.

**Сотников Илья Андреевич** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: eparu@knastu.ru.

**Ilia A. Sotnikov** – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: eparu@knastu.ru.

**Годяев Александр Иванович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматика, телемеханика и связь» Дальневосточного государственного университета путей сообщений (Россия, Хабаровск); 680021, Хабаровский край, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47. E-mail: at@festu.khv.ru.

**Alexander I. Godyaev** – Doctor of Engineering, Professor, Head of Automation, Telemechanics and Communications Department, Far Eastern State Transport University (Russia, Khabarovsk); 680021, Khabarovsk Territory, Khabarovsk, st. Serysheva, 47. E-mail: at@festu.khv.ru.

**Аннотация.** В связи с усложнением предъявляемых требований к системам автоматизированного управления в различных отраслях возникает исключительно важная проблема, связанная с созданием подобных систем. На сегодняшний день невозможно обеспечить качественное управление сложным объектом без системы управления, которая основана на достаточно точной математической модели. Такая модель должна учитывать большинство имеющихся подходов к формализации объектов регулирования, а именно: повышение точности и качества математического описания, возможность оперирования качественными характеристиками на основе сформированной системы ограничений и допущений. Некоторыми направлениями расширения интеллектуальных возможностей являются как структурные решения (реализация вложенностей), так и параметрические (моделирование функций принадлежности пространственной формы). В рамках данной работы был выполнен синтез системы управления многодвигательной установкой, разработанная система управления представляет собой многокаскадный нечёткий регулятор.

**Summary.** Due to the increasing complexity of the requirements to automated control systems in various industries, there is an extremely important problem associated with the creation of such systems. Today, it is impossible to provide quality control of a complex object without a control system, which is based on a sufficiently accurate mathematical model. Such a model must take into account most of the existing approaches to formalization of control objects, namely: increasing the accuracy and quality of mathematical description, the ability to operate qualita-

tive characteristics based on the formed system of constraints and assumptions. Some directions of extending intellectual capabilities are both structural solutions (realization of nesting) and parametric ones (modeling of spatial form belonging functions). As part of this work, the synthesis of the control system of a multi-gear machine was performed; the developed control system is a multicasade fuzzy controller.

**Ключевые слова:** нечёткий логический регулятор, терм, нечёткое множество, лингвистическая переменная, функция принадлежности.

**Key words:** fuzzy logic controller, term, fuzzy set, linguistic variable, membership function.

*Исследования проводятся в рамках гранта № ВНО10/2021 «Разработка принципов построения интеллектуальных систем управления сложными техническими объектами на основе критерии энергоэффективности».*

УДК 681.5.01:658.5

**Введение.** На сегодняшний день существует множество методик по внедрению нечётких регуляторов в системы управления объектами. Одной из таких методик является реализация многокаскадности нечёткого логического регулятора, которая позволяет повысить универсальность реализуемого регулятора, расширить его адаптивные свойства и значительно упростить процессы настройки и перенастройки; также реализация многокаскадного регулятора позволяет избавиться от информационной избыточности и алгоритмической сложности благодаря реализации в виде единого модуля [10; 11].

Кроме того, принятие решений с учётом множества критериев, действующих на систему управления, представляет собой отдельный класс задач, особенно если реализуемые критерии противоречат друг другу. В рамках данной работы представлено моделирование многокаскадной нечёткой системы управления для решения многокритериальных задач по управлению, обладающей достаточными универсальными свойствами для реализации работы многодвигательной системы. Объект управления представляет собой систему электроприводов постоянного тока различной мощности [1; 2; 3]. Задача по реализации закона регулирования для такого объекта с учётом сочетания ряда критериев управления лингвистически может быть сформулирована следующим образом: быстродействие системы и отработка больших отклонений производится более мощным элементом системы электроприводов, а в целях экономии и при действии различных возмущающих факторов стабилизация системы проводится включением маломощного элемента.

Для реализации многодвигательной системы была выбрана модель электропривода, представленная на рис. 1. В данной модели подчинённого регулирования приняты настройки всех контуров управления на модульный оптимум [4; 5; 8].

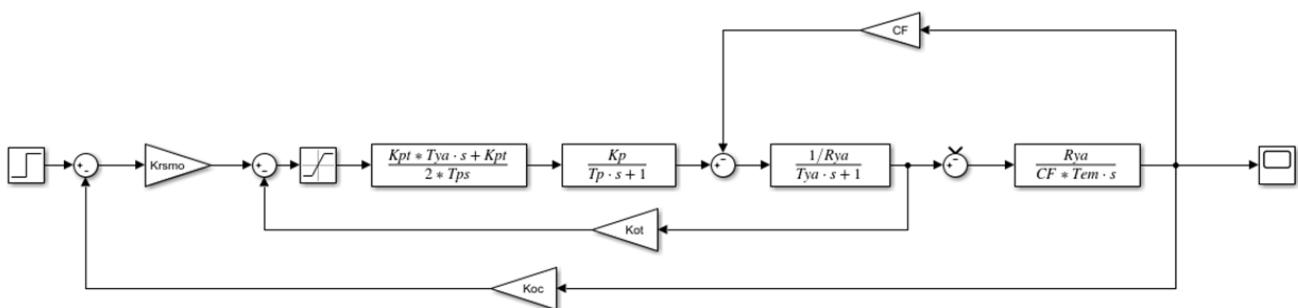


Рис. 1. Имитационная модель электропривода постоянного тока

Переходный процесс в системе электропривода постоянного тока, представленного имитационной моделью (см. рис. 1), показывает характеристика, изображённая на рис. 2.

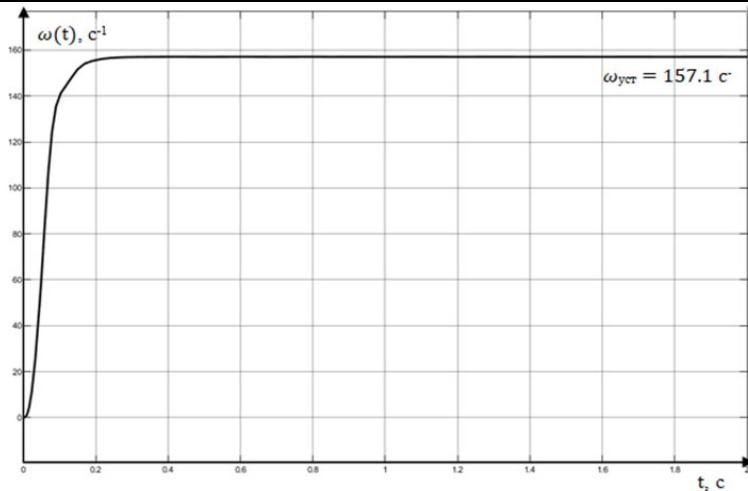


Рис. 2. Выходная характеристика имитационной модели

**Моделирование многокаскадного нечёткого логического регулятора.** Нечёткая система управления таким многодвигательным объектом будет построена на основе многокаскадного подхода [6; 7; 9]. При таком построении развитой интеллектуальной системы управления на вложенные модули возлагаются функции управления отдельными электроприводами, а настройка параметров нечётких регуляторов будет осуществляться на основе общих представлений эксперта о поведении системы. Для синтеза нечёткой многокаскадной системы управления рассмотрим регулятор скорости, настроенный на модульный оптимум, и заменим его нечётким логическим регулятором.

Классический регулятор скорости для системы подчинённого регулирования, представленной на рис. 1, замещается элементарным нечётким логическим регулятором (НЛР) со следующей нотацией: механизм вывода Мамдани, единственные лингвистические переменные на входе и выходе регулятора, соответственно, терм-множества лингвистических переменных, формализующих понятия входных и выходных сигналов, определяются пятью элементами, функции принадлежности нечётких термов реализованы аппроксимированной формой, распределение нечётких термов лингвистических переменных входа и выхода принято равномерным и показано на рис. 3 и 4.

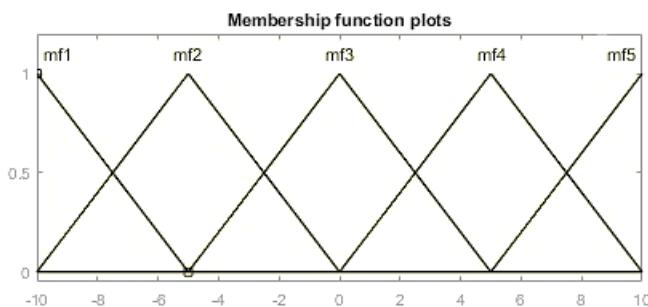


Рис. 3. Распределение нечётких термов лингвистической переменной «input1»

База знаний для вложенного нечёткого модуля представляет собой полный перечень нечётких продукционных правил следующего содержания:

1. Есть (input1 есть mf1) тогда (output1 есть mf1)
2. Есть (input1 есть mf2) тогда (output1 есть mf2)
3. Есть (input1 есть mf3) тогда (output1 есть mf3)
4. Есть (input1 есть mf4) тогда (output1 есть mf4)
5. Есть (input1 есть mf5) тогда (output1 есть mf5)

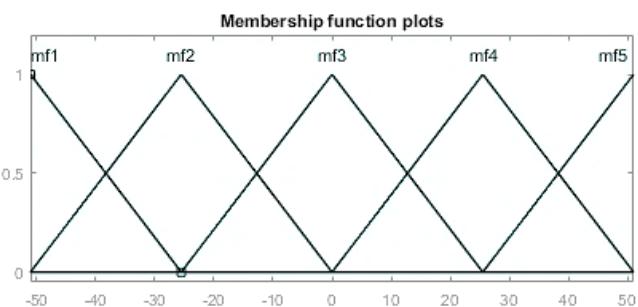
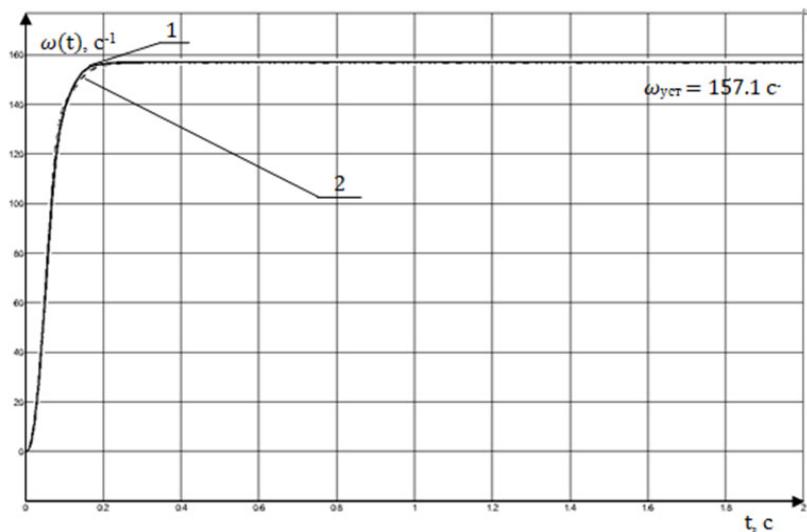


Рис. 4. Распределение нечётких термов лингвистической переменной «output1»

Выходная характеристика полученной системы при её сравнении с исходной моделью с классическим регулятором представлена на рис. 5.

Для построения нечёткого логического регулятора, формирующего внешний каскад на основе полученных данных, и с учётом обозначенного ранее ряда критериев необходимо выделить перечень требований, основными среди которых будут следующие:

1. осуществлять постоянный контроль главного электропривода в зависимости от поступившего на основной регулятор задания;
2. включать вспомогательный электропривод в моменты образования незначительных просадок в работе основного электропривода;
3. регулировать уровень выходного сигнала вспомогательного электропривода таким образом, чтобы его выходной сигнал мог компенсировать появившуюся просадку и поддерживать выходной сигнал всей системы на заданном уровне.



1 – выходная характеристика полученной системы;

2 – выходная характеристика исходной системы

Рис. 5. Выходная характеристика имитационной модели с НЛР

На основании изложенных требований можно сформулировать набор входных данных и сигналов, при обработке которых внешний каскад развитой нечёткой системы управления сможет формировать сигналы задания для элементарных модулей внутреннего каскада и реализовывать выполнение всех возложенных на него задач:

1. Канал обратной связи по скорости вращения основного электропривода, что соответствует информационной составляющей, позволяющей контролировать текущее состояние выходного сигнала основного электропривода.

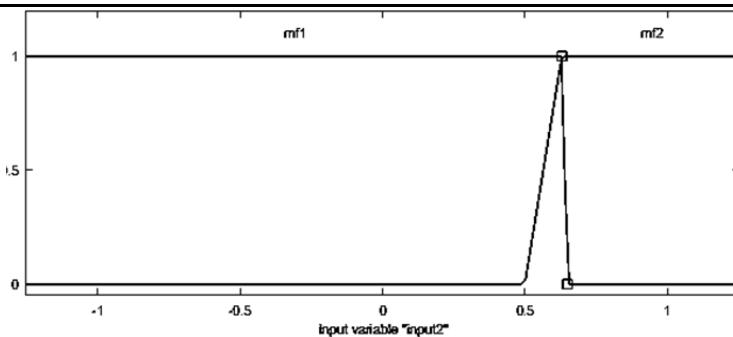


Рис. 8. Размещение нечётких термов лингвистической переменной input2

Формирование закона управления вспомогательным электроприводом обеспечивается лингвистической переменной «SecondDpt» (см. рис. 9) с двумя аппроксимированными функциями принадлежности.

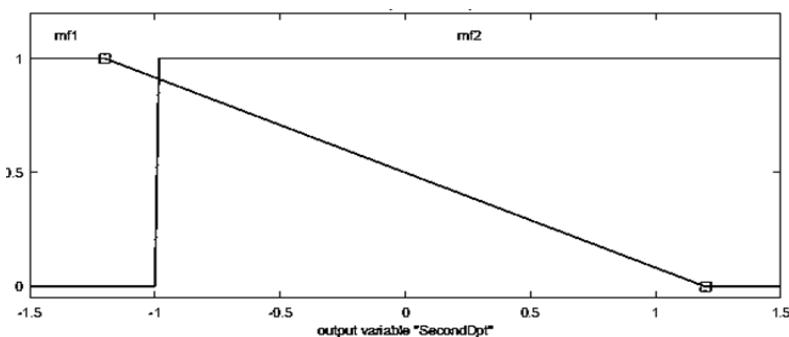


Рис. 9. Размещение нечётких термов лингвистической переменной SecondDpt

База знаний регулятора представляет собой следующий перечень:

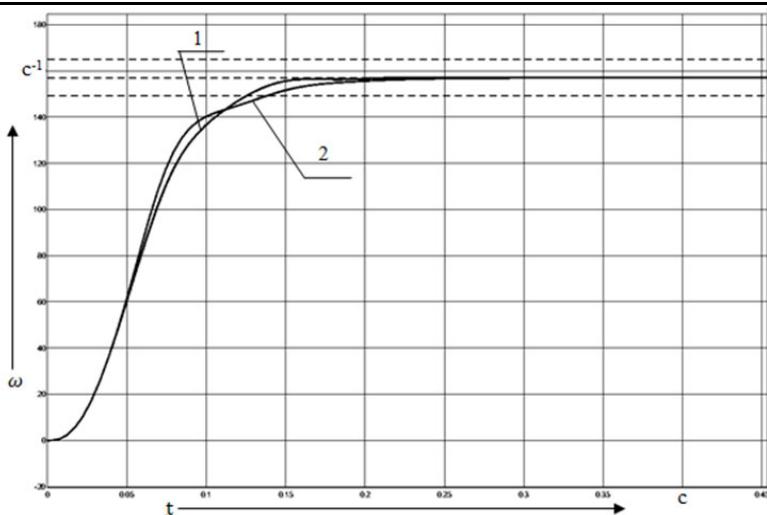
1. Если «input1» есть mf1, то «FirstDPT» есть mf1;
2. Если «input1» есть mf2, то «FirstDPT» есть mf2;
3. Если «input1» есть mf3, то «FirstDPT» есть mf3;
4. Если «input1» есть mf4, то «FirstDPT» есть mf4;
5. Если «input1» есть mf5, то «FirstDPT» есть mf5;
6. Если «input2» не есть mf1, то «SecondDPT» есть mf2.

Условие, задаваемое правилом № 6, ориентировано на выполнение дополнительного критерия по управлению и реализует функцию подключения вспомогательного электропривода.

**Результаты моделирования.** Применение развитой нечёткой системы в условиях много-критериальности не снижает требований к ней в части улучшения основных показателей регулирования, реализуемых любой классической системой управления. Проведём оценку полученной многокаскадной нечёткой системы с учётом сокращения времени регулирования и снижения величины перерегулирования.

Проанализируем поведение полученной модели с нечётким многокаскадным регулятором и сравним реакцию систем с нечётким и с классическим регулятором на номинальный входной сигнал – единичное ступенчатое воздействие (см. рис. 10).

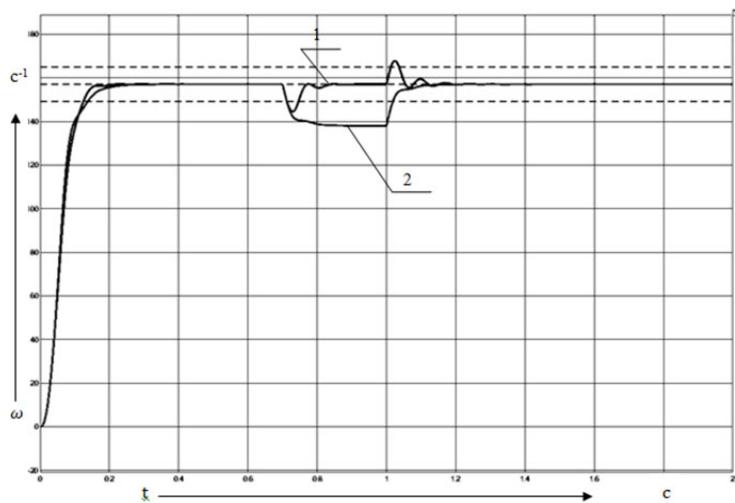
На основании полученной на рис. 10 характеристики можно сделать вывод, что система, в которой используется многокаскадный нечёткий регулятор, выходит на заданный уровень и имеет лучшие показатели регулирования: меньшее время регулирования и отсутствие перерегулирования. При этом необходимо отметить, что представленная характеристика достигается только за счёт реализации процедур управления более мощной частью многодвигательной системы и на данном этапе не приводит к использованию канала меньшей мощности.



1 – система с нечётким регулятором; 2 – система с классическим регулятором

Рис. 10. Реакция системы на подачу сигнала задания

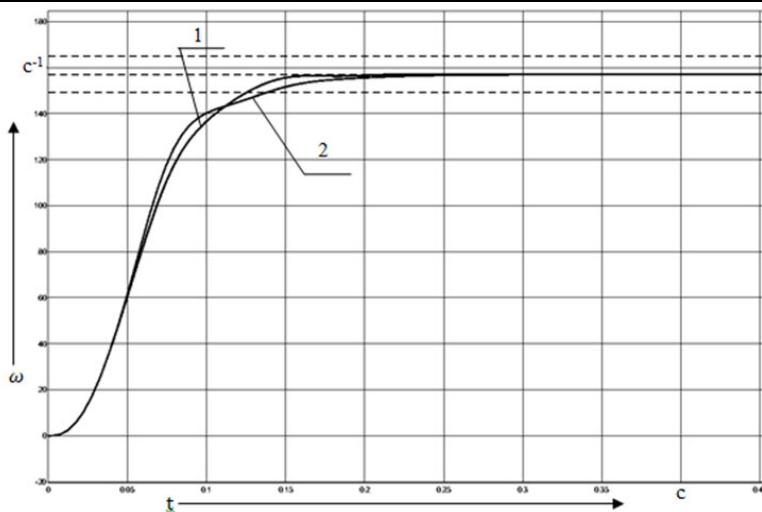
На рис. 11 представлены переходные процессы в системе в результате действия внешнего воздействия, имеющего импульсную природу. При этом прогнозируемое поведение классической системы управления обеспечивает функционирование системы исходя из заданных требований и показателей качества. Интеллектуальная система имеет расширенные адаптивные свойства, что позволяет ей гибко реагировать на изменения внешних условий за счёт подключения канала управления с приводом меньшей мощности. Необходимо отметить, что параметры импульсного возмущающего воздействия были подобраны таким образом, чтобы использовать оба возможных канала управления.



1 – система с нечётким регулятором; 2 – система с классическим регулятором

Рис. 11. Реакция систем на подачу импульсного возмущающего воздействия

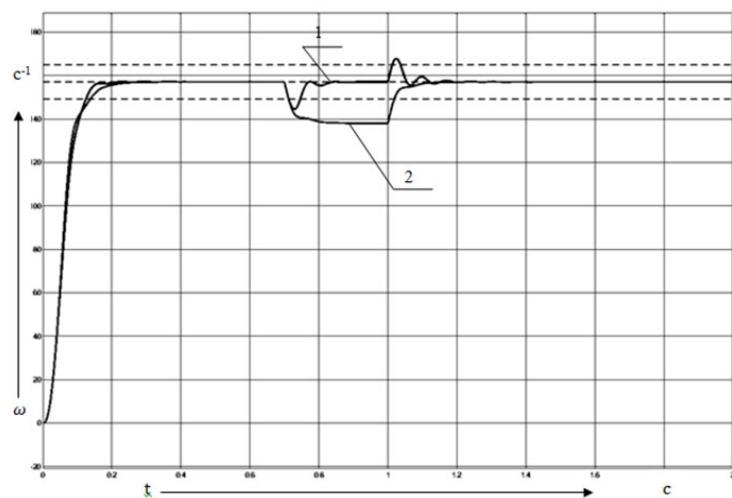
**Заключение.** Исходя из представленных результатов имитационного моделирования, полученная система управления многодвигательной установки на базе нечётких регуляторов способна обеспечить работу объекта регулирования как в номинальном режиме, так и при подаче на систему внешнего возмущения. С учётом дополнительных возможностей как по управлению, так и с точки зрения исполнительных устройств показано применение дополнительного критерия,



1 – система с нечётким регулятором; 2 – система с классическим регулятором

Рис. 10. Реакция системы на подачу сигнала задания

На рис. 11 представлены переходные процессы в системе в результате действия внешнего воздействия, имеющего импульсную природу. При этом прогнозируемое поведение классической системы управления обеспечивает функционирование системы исходя из заданных требований и показателей качества. Интеллектуальная система имеет расширенные адаптивные свойства, что позволяет ей гибко реагировать на изменения внешних условий за счёт подключения канала управления с приводом меньшей мощности. Необходимо отметить, что параметры импульсного возмущающего воздействия были подобраны таким образом, чтобы использовать оба возможных канала управления.



1 – система с нечётким регулятором; 2 – система с классическим регулятором

Рис. 11. Реакция систем на подачу импульсного возмущающего воздействия

**Заключение.** Исходя из представленных результатов имитационного моделирования, полученная система управления многодвигательной установки на базе нечётких регуляторов способна обеспечить работу объекта регулирования как в номинальном режиме, так и при подаче на систему внешнего возмущения. С учётом дополнительных возможностей как по управлению, так и с точки зрения исполнительных устройств показано применение дополнительного критерия,

позволяющего решать вопросы энергоэффективности. Применение развитых нечётких систем придаёт объекту регулирования гибкость как при реализации процедур управления, так и в процессе функционирования, что существенно отличает предложенный подход от классических принципов. Однако наличие элементарных модулей во внутреннем каскаде может привести к необходимости коррекции таких элементов в части внедрения дополнительных лингвистических переменных с целью снижения недостатка информации о функционировании технологического процесса и поиска компромиссных решений в условиях многокритериальности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Стельмащук, С. В. Синтез ПИД-регулятора системы автоматического регулирования с максимальным быстродействием и ограничением на перерегулирование / С. В. Стельмащук, А. Ю. Чернов // Электротехнические системы и комплексы. – 2012. – № 20. – С. 256-265.
3. Savelyev D. O., Gudim A. S., Solovev D. B. Stabilizing the transients in the objects and systems controlling the compensation of nonlinear ACS (automatic control system) elements // 2019 International Science and Technology Conference «EastConf», EastConf 2019. 2019. Р. 8725324. DOI: 10.1109/Eastonf.2019.8725324.
4. Башарин, А. В. Управление электроприводами: учебное пособие для вузов / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
5. Стельмащук, С. В. Согласованное управление транспортировки ленты с модальным регулятором / С. В. Стельмащук, Д. В. Капустенко // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2019. – № I-1 (38). – С. 28-40.
6. Соловьев, В. А. Нечёткое управление в системе регулирования позиционных электроприводов стержневой установки / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, В. В. Тетерин // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 5. – С. 77-80.
7. Один из подходов к моделированию двухкаскадной нечёткой системы управления электроприводом постоянного тока с двухзонным регулированием скорости / С. П. Черный, В. А. Соловьев, А. В. Бузикаева, С. И. Сухоруков // Электротехнические системы и комплексы. – 2022. – № 2 (55). – С. 32-39.
8. V. I. Susdorf, A. S. Meshkov and M. T. Aung, International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon, Vladivostok, 2018), p. 8602556. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602556.
9. Cherniy S. P. Analysis of approaches to modelling the fuzzy control systems with extension of their functional capabilities / S. P. Cherniy, A. V. Buzikayeva, V. I. Susdorf, V. N. Khrulkov. – EAI Endorsed Transactions on Energy Web, 2020, ew 18: e19. DOI:10.4108/eai.13-7-2018.165496.
10. Piegat, A. Horizontal membership function and examples of its application / A. Piegat, M. Landowski. – International Journal of Fuzzy Systems, 2015, 17(1), p. 22-30.
11. Mazandarani, M. Sub-optimal control of fuzzy linear dynamical systems under granular differentiability concept / M. Mazandarani, N. Pariz. – ISA Trans 2018;76:1-17.
12. Mazandarani, M. A Review on Fuzzy Differential Equations / M. Mazandarani, L. Xiu. – IEEE Access, 2021, 9, p. 62195-62211.



Ким К. К., Иванов С. Н., Дружинин В. А., Шевченко Я. Е., Азимов Х. Х.  
K. K. Kim, S. N. Ivanov, V. A. Druzhinin, Y. E. Shevchenko, Kh. Kh. Azimov

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ЛЬДООБРАЗОВАНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

### MODELING OF STRESSES IN ICE FORMATION ELEMENTS UNDER MECHANICAL LOADING

**Ким Константин Константинович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и теплоэнергетики Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (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, Head of Electrical Engineering and Thermal Power Engineering Department, Sankt-Petersburg State Transport University (Russia, Sankt-Petersburg); house 9, Moskovsky Ave., Sankt-Petersburg, Russia. 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 Engineering, Professor, Electromechanics 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.

**Дружинин Владимир Александрович** – студент кафедры электромеханики Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: em@knastu.ru.

**Vladimir A. Druzhinin** – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: em@knastu.ru.

**Шевченко Яна Евгеньевна** – студент кафедры «Дизайн архитектурной среды» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: das@knastu.ru.

**Yana E. Shevchenko** – Student, Architectural Environment Design Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: das@knastu.ru.

**Азимов Хурсандмурад Хакимович** – аспирант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: keparu@knastu.ru.

**Khursandmurod Kh. Azimov** – Postgraduate Student, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: keparu@knastu.ru.

**Аннотация.** Рассмотрена актуальность разработки электромеханической системы на основе анализа результатов имитационного моделирования напряжённо-деформированного состояния элементов льдообразования. Приведён обзор используемых на практике методов и конструктивных решений, направленных на решение рассматриваемой задачи. Проанализированы теоретические процессы образования наледи. Предложен новый подход реализации системы с использованием непосредственного асинхронного привода возвратно-поступательного движения. Приведена методика определения мощности привода электромеханической системы с учётом закона распределения удаляемых элементов и «модели слабейшего звена».

**Summary.** The relevance of electromechanical system development based on the analysis of the results of simulation of the stress-strain state of the elements of ice formation is considered. An overview of the methods used in practice and constructive solutions aimed at solving the problem under consideration is given. The theoretical processes of ice formation are considered. A new approach to the implementation of the system using a direct asynchronous reciprocal

cating drive is proposed. A method for determining the drive power of an electromechanical system is given, taking into account the distribution law of the elements to be removed and the «weakest link model».

**Ключевые слова:** моделирование, льдообразование, электромеханическая система, напряжённо-деформированное состояние.

**Key words:** modeling, ice formation, electromechanical system, stress-strain state.

УДК 621.313:621.317.39

**Введение.** Одной из актуальных проблем, которым уделяется постоянное внимание со стороны самых различных организаций, является образование на карнизах и водостоках крыш сосулек, представляющих опасность для всего, что находится под ними. Свисающая наледь нередко становится причиной травмирования проходящих мимо людей, а иногда и летальных исходов. Ежегодно жертвами сосулек становится от 500 до 2000 человек по всему миру [1–3]. Это также наносит существенный ущерб имуществу в виде обрушения крыш, козырьков, водосточных труб, нанесения повреждений припаркованным автомобилям. Для примера, Хабаровский край занимает 3-е место среди регионов, где автовладельцы заявляли об ущербе, нанесённом автомобилям вследствие падения снега и льда в 2020–2021 годах.

Причины образования сосулек можно разделить на две категории: естественные и искусственные [4; 5]. К естественным причинам относятся суточные колебания температур, т. е. днём температура переходит нулевой порог и снег на крыше начинает подтаивать, а ночью талая вода снова замерзает, тем самым образуя наледь. К искусственным причинам относится плохая теплоизоляция крыши, из-за чего тёплый воздух из помещений способствует таянию снега и его последующему замерзанию ночью. Отличие состоит лишь в том, что при плохой теплоизоляции процесс образования наледи происходит круглосуточно, что делает её объём ещё больше.

Воздействие льда может быть катастрофическим не только для природных, но и для гражданских и промышленных объектов, что указывает на то, что проблема обледенения, точнее устранение последствий этого процесса, является актуальной для большинства объектов любой инфраструктуры.

Благодаря своим физическим свойствам лёд может разрушать оборудование, негативно воздействовать на строительные конструкции и со временем нарушать их целостность и делать их небезопасными. Обледенение может ухудшить аэродинамические свойства летательных аппаратов и тем самым привести к аварии, под собственным весом оборвать провода и привести к отключению электроэнергии, нарушить работу газоперекачивающих станций и гидрозатворов. Как отмечено выше, даже падая с крыши здания, лёд способен повредить припаркованные вблизи здания автомобили или нанести серьёзный вред здоровью людей.

Кроме того, скопление льда на крыше может вызвать значительные нагрузки на её конструкцию, а забитые льдом водостоки могут повредить верхние элементы здания.

В настоящее время для борьбы с обледенением используется много различных методов. Основным, который применяется в железнодорожной практике, является термический метод, заключающийся в удалении наледи с поверхности путём её нагрева. Данный метод в большинстве случаев имеет высокое энергопотребление, а в случае очистки крыш нагревательные устройства сами по себе имеют высокую стоимость. Поэтому при удалении наледи чаще обходятся механическим методом, вручную удаляя образовавшуюся наледь.

**Теоретический процесс льдообразования.** Образование льда происходит в результате скопления влаги, подвергшейся воздействию низкой температуры. Существуют классический и альтернативный механизмы, которые поясняют принцип образования льда. Классический подход предполагает таяние снежинок из более холодных слоёв облаков в более тёплых, и затем их повторное охлаждение ниже 0 °C в более низком, холодном слое, из-за чего они выпадают в виде переохлаждённых капель. Альтернативный механизм представляет собой столкновение и последующее соединение облачных капель при температурах немного ниже нуля, что приводит к образованию замерзающих осадков.



На состояние жидкой воды влияет множество факторов, в том числе материал и температура поверхности, на которой она находится. Существуют три режима образования льда: жидкий, влажный и сухой. При температуре поверхности не ниже  $+2^{\circ}\text{C}$  образования льда путём кристаллизации не произойдёт. Если температура будет оставаться чуть выше точки замерзания, то вода останется в виде капель. Таким образом, лёд будет либо таять, либо вообще не будет образовываться – это жидкий режим. При влажном режиме льдообразования температура поверхности должна быть равна температуре замерзания воды, при этом изменяется доля замерзающей жидкости. Сухой режим отличается от прошлых двух режимов отсутствием воды и температурой ниже нуля [2; 3].

На скорость процесса обледенения и величину образовавшейся наледи влияет множество факторов, к ним относятся: размер капель жидкости, температура поверхности, влажность и температура воздуха, солёность воды, присутствие определённых химических веществ или частиц в атмосфере, наличие ранее существовавшего льда, а также его температура. Температура принимается наиболее важным фактором, т. к. она определяет, когда молекулы в воде замедляются настолько, чтобы образовать кристаллы. Воздушный поток также существенно влияет на скорость, с которой молекулы воды могут перемещаться. Кроме этого, наличие некоторых химических веществ или частиц в атмосфере может влиять на способ образования льда, катализировать или изменять форму образующихся кристаллов.

Процесс обледенения можно рассматривать как происходящий поэтапно [5]. Первая стадия характеризуется столкновением капель воды с поверхностью объекта. Эффективность этого столкновения зависит от коэффициента захвата, на который влияет форма и размер капель, скорость потока воздуха, а также размер и форма самого объекта, подвергающегося обледенению.

Второй этап процесса заключается в удержании капли на поверхности. Этот этап зависит от суммарного объёма жидкости, покидающего поверхность обледенения. На сухой поверхности, температура которой ниже температуры замерзания воды, капли быстро замерзают и остаются на месте. При наличии на поверхности влаги капля также не отскакивает, но часть её всё же уходит с поверхности. Несмотря на недостаточную эффективность прилипания сухого снега известны результаты исследования, когда сухой снег прилипал к поверхности при скорости ветра менее  $2 \text{ м/с}$ , из-за чего образовывалась наледь [2]. Таким образом, снег налипает более эффективно на влажные поверхности при определённой температуре и относительно низких скоростях соударения.

Третий этап – кристаллизация капли, его можно разделить на несколько стадий, начиная с образования мельчайших микрокристаллов льда и заканчивая быстрым формированием структуры лёд-жидкость и переходом в состояние температурного баланса при температуре затвердевания. Далее следует более медленный процесс полного замерзания. Часть капли замерзает, и в результате переохлаждённая жидкость нагревается до температуры затвердевания и замерзает оставшаяся часть жидкости. В работе [5] показано, что на поверхности с отрицательной температурой замерзание капли воды с температурой  $0^{\circ}\text{C}$  происходит за несколько секунд. Для крупных капель потребуется немного больше времени для затвердевания. При переохлаждённом дожде образование льда может занять значительно больше времени, т. к. процессу замерзания препятствует соединение капель воды на поверхности с каплями, только попавшими на поверхность, это связано с аккумулированной в них теплотой, повышающей температуру воды.

Образование льда – многоэтапный и довольно сложный процесс, который зависит от параметров окружающей среды и температуры поверхности, причём чем ниже температура поверхности, тем быстрее увеличивается наледь. Первичные элементы льдообразования в зависимости от режима намерзания могут начать образовываться всего за минуты при соответствующих скоростях ветра, температурах поверхности и окружающей среды.

**Моделирование напряжений в элементах льдообразования.** Для предотвращения образования и удаления наледи в настоящее время применяются различные методы и способы. Из существующих методов следует выделить два основных, связанных с тепловым и механическим воздействием на элементы льдообразования. Количество реализуемых способов существенно больше и связано с многочисленными конструкциями и технологиями, применяемыми для удаления льда.

Самым простым, но при этом достаточно результативным, является ручной способ. В этом случае лёд сбивается вручную при помощи вспомогательного инструмента, часто с использованием альпинистского снаряжения, которое обеспечивает необходимый доступ, или с применением спецтехники, например автомобильного подъёмника. Это один из наиболее опасных для исполнителей вариантов.

Удаление сосулек пневматическим оружием также опасный способ, требующий обязательной регистрации оружия, установки заграждения и наличия охраны.

Существуют способы устранения льда лазером, электрическим импульсом и ультразвуком. Вследствие высокой стоимости они применяются редко.

Более безопасными могут считаться способы, связанные с применением специальных антиобледенительных систем, например, использующих теплогенерирующие кабели. Система включает в себя устройство управления, крепёжные элементы, греющие секции из резистивного или саморегулирующегося кабеля и распределительную сеть. На такой основе предложена реализация в виде устройства, использующего гибкие элементы, подключённые к электрическому кабелю.

Ещё один, но редко используемый способ основан на воздействии пара и заключается в облегчённом отделении льда от крыши. Пар под давлением, создаваемым при помощи снабжённого шлангом газового баллона, разрушает лёд, и последний отделяется от поверхности.

В качестве конкретных технических решений может быть рассмотрено устройство для устранения снега, наледи и сосулек с крыш зданий [6]. Оно содержит вентилятор, который через сопло засасывает воздух из-под крыши и перемещает его через эжектор, обеспечивающий условия для всасывания тёплого воздуха и создания его избыточного давления.

В работе [7] предложено устройство, содержащее низковольтные вибрационные электродвигатели, действующие на элементы льдообразования.

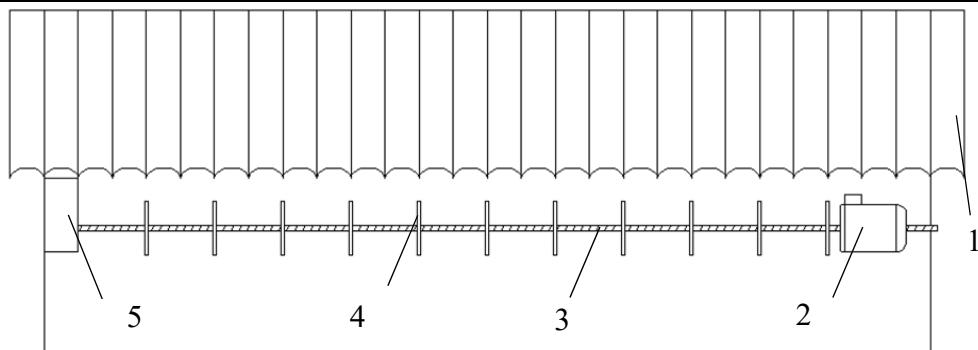
Анализ основных направлений разработки рассматриваемых технических систем показывает, что наиболее перспективным является переход на автоматизированные системы с механическим воздействием на элементы льдообразования.

Одно из эффективных решений, связанное с созданием автоматических комплексов для удаления наледи с крыш зданий, основано на применении непосредственных электромеханических преобразователей возвратно-поступательного движения [8].

Техническая реализация, принцип действия и особенности проектирования таких устройств описаны в [9–12].

На рис. 1 показан общий вид электромеханического устройства для очистки крыши от сосулек. В ротор асинхронного электродвигателя встроена винтовая передача, которая обеспечивает осевое перемещение исполнительного механизма (тяги) в зависимости от направления вращения двигателя. На тяге расположены лопатки произвольной формы, обеспечивающие при линейном смещении достаточное для разрушения льда усилие. Конструкция включает опорные элементы, не толькодерживающие тягу при воздействии изгибающих нагрузок, но и препятствующие её тангенциальному (вращательному) перемещению.

Электромеханическая система предназначена для удаления элементов льдообразования с крыш зданий 1 в автоматическом режиме. Управляющим сигналом является видеинформация, поступающая с датчика контроля образования сосулек (например, видеокамеры), с использованием способа идентификации, основанного на сравнении информации о параметрах льдообразования, поступающей из видеопотока, например линейного размера сосулек, и сравнение полученной информации с заранее заданными значениями, внесёнными в базу данных системы управления. Далее результат обработки полученной информации и информации, хранящейся в базе данных команд системы управления, формируется в управляющую команду для электромеханического преобразователя 2. После формирования и получения управляющей команды автоматическая электромеханическая система в зависимости от сформированной устройством управления управляющей команды получает напряжение от источника питания. Это приводит к движению вращающейся вторичной обмотки и осевому перемещению тяги 3, на которой расположены лопатки 4, которые, перемещаясь вдоль крыши, удаляют сосульки. Отдельная задача, не рассматриваемая в данной статье, связана с выбором формы лопаток.



1 – крыша; 2 – электродвигатель; 3 – шнек; 4 – лопатки; 5 – опора

Рис. 1. Общий вид электромеханического устройства для очистки крыши от сосулек

Примеры внешнего исполнения предлагаемой системы для удаления льда, учитывающие архитектурные особенности строений, показаны на рис. 2.

Система управления формирует реверсивный режим работы электромеханического преобразователя, обеспечивающий возвратно-поступательное перемещение лопаток вдоль крыши. Опора скольжения 5 допускает линейное осевое (вдоль крыши) движение тяги и, соответственно, лопаток, но препятствуют их тангенциальному (вращательному) перемещению.

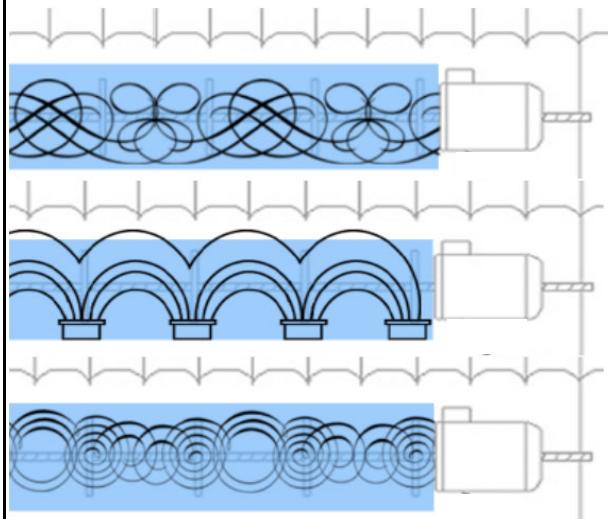


Рис. 2. Варианты внешнего исполнения системы для удаления льда

нагрузки, например, позиция на рис. 2, *а* соответствует усилию в области наибольшего сечения, позиция на рис. 2, *г* – в зоне минимального.

На рис. 3 приведены величины напряжений при аналогичных нагрузках: на рис. 3, *а* – в области наибольшего сечения, позиция на рис. 3, *г* – в зоне минимального.

Анализ результатов моделирования позволяет найти величины напряжений, возникающих на различном удалении от основания исследуемого элемента (см. рис. 5), определяющие требуемую мощность для его разрушения.

Необходимо отметить, что место приложения усилия должно соответствовать требованию безопасного удаления льда для объектов, попадающих в зону их возможного падения.

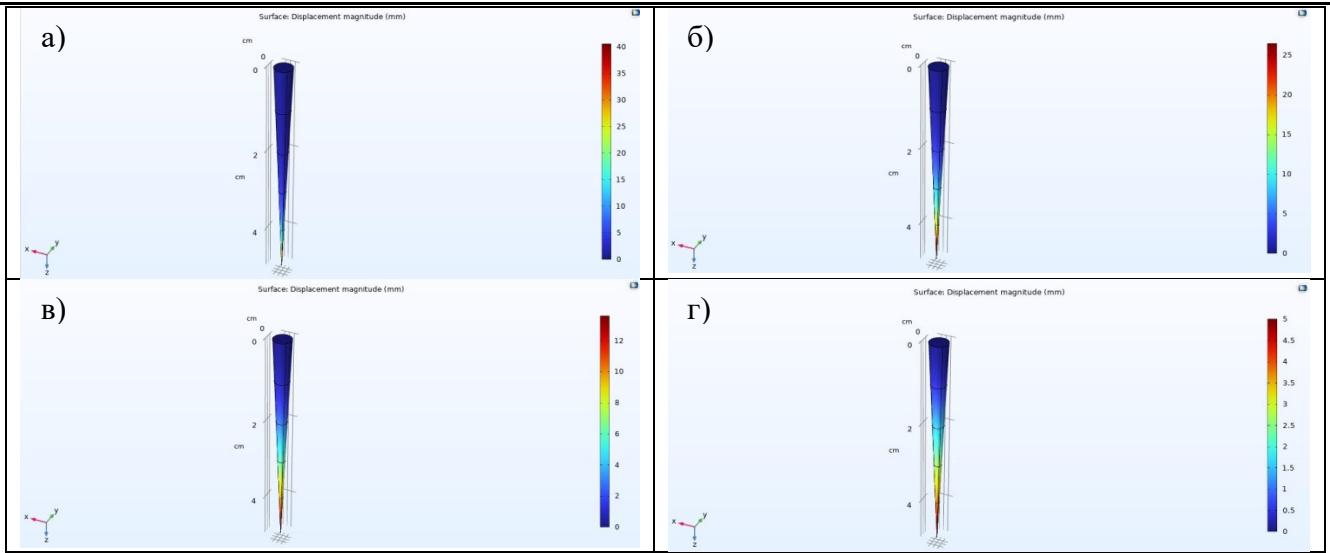


Рис. 3. Величины перемещений при упругой деформации

Для определения мощности двигателя необходимо связать длину покрытой льдом части и необходимую для её удаления удельную мощность. Очевидно, что разрушение будет происходить последовательно, начиная с любого наиболее нагружаемого из элементов, поэтому минимальная расчётная мощность двигателя  $P_{\min}$  должна незначительно превышать мощность, необходимую для удаления отдельной сосульки, т. е. удельную мощность, отнесённую на расстояние между двумя смежными лопатками.

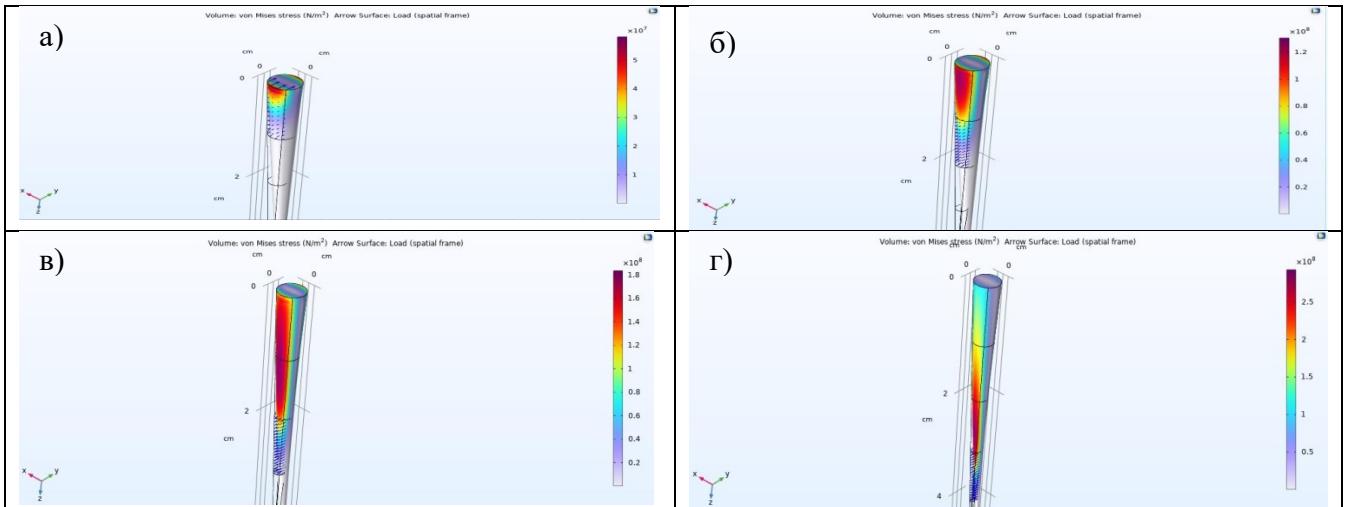


Рис. 4. Величины напряжений

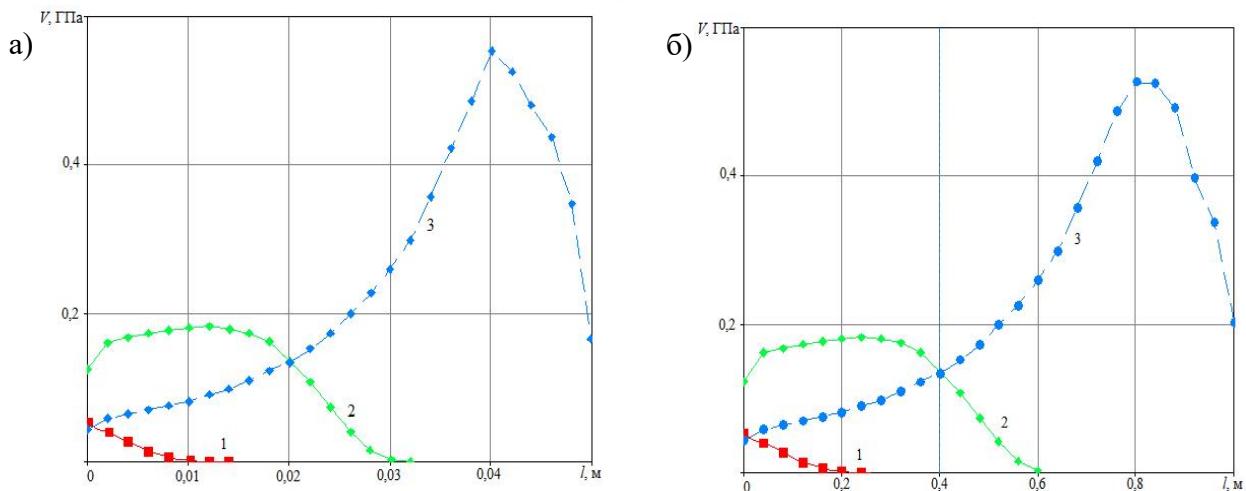
Поскольку процесс льдообразования носит случайный характер, то при выборе расчётной мощности можно использовать два подхода.

Первый предполагает наличие генеральной совокупности статистических данных и даёт возможность определения количества одновременно удаляемых элементов на основе одного из законов распределения, например, нормального. Это представляет сложную научную задачу, т. к. при строгой постановке задачи требует учёта фазового перехода материала исследуемого объекта.

В основу второго подхода может быть положена модель «слабейшего звена», которая часто применяется для оценки надёжности сложно моделируемых технических систем [13]. В этом случае рассматривается система, состоящая из  $n$  последовательных удаляемых элементов, причём удаляется сначала самый нагруженный элемент, затем следующий по степени нагружения и т. д.

Использование такой модели позволяет существенно упростить определение требуемой мощности двигателя и одновременно обеспечивает приемлемую точность. В качестве «слабейшего звена» может быть принят произвольный элемент, а задача определения требуемой мощности будет формулироваться следующим образом: найти вероятность того, что приложенное напряжение превысит механическую прочность элемента. Далее рассматриваются плотность функции распределения приложенного напряжения  $f(\sigma)$  и плотность распределения прочности удалаемых элементов  $f(E)$ . Очевидно, что если на заданном интервале прочность выше напряжения, то разрушения не происходит. Вероятность безотказной работы элемента записывается в виде

$$P_{\text{эл}}(t) = P_1(E > \sigma).$$



1 – усилие приложено к основанию; 2 – усилие приложено к середине элемента;  
 3 – усилие приложено в области вершины

Рис. 5. Величины напряжений при различной длине элементов: а – 0,05 м; б – 1,0 м

Вероятность того, что напряжение принадлежит заданному интервалу  $d\sigma$ , а прочность  $E$  превышает значение напряжения, определяется как произведение вероятностей:

$$P(\sigma \in d\sigma \cap E > \sigma) = f(\sigma)d\sigma \int_{d\sigma/2}^{\infty} f(E)dE.$$

Вероятность неразрушения любого элемента определяется аналогично при подстановке реальных пределов интегрирования:

$$P_{\text{эл}}(t) = \int_0^{\infty} \int_{\sigma}^{\infty} f(\sigma)f(E)dEd\sigma.$$

Используя аналогию с работой механических сопряжений, можно допустить, что количество одновременно удалаемых элементов не превышает трёх. Соответственно, требуемая расчётная мощность двигателя будет определяться как  $3P_{\text{min}}$ , или приближённо

$$P_{\text{расч}} \approx 3 P_{\text{min}} = 3M_{\text{эм}}\omega_2.$$

В этом выражении электромагнитный момент  $M_{\text{эм}}$ , развиваемый электромеханическим преобразователем (асинхронным двигателем), может быть найден как

$$M_{\text{эм}} = \frac{pm_1\Delta U_1^2 r_2'}{\omega_1 \left( (r_1 + c_1 r_2')^2 + (x_{\sigma 1} + c_1 x_{\sigma 2}')^2 \right)},$$

где  $p$  – число пар полюсов;  $m_1$  – число фаз;  $\Delta U_1$  – изменение напряжения вследствие перемещения объекта измерения;  $c_1$  – численный коэффициент приведения схемы замещения;  $\omega$  – угловая частота;  $r_1, r_2'$  – активные сопротивления;  $x_{\sigma 1}, x_{\sigma 2}'$  – индуктивные сопротивления статора и ротора двигателя.

Зная мощность двигателя, можно решить и обратную задачу: найти величину силы, действующей на удалаемый объект, которая в общем случае может быть найдена на основании уравнения Лагранжа первого рода [14]:

$$m_v \cdot w_v = F_v \sum_{\alpha=1}^r \lambda_{\alpha} \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial r_v} + \sum_{\beta=1}^r R_v,$$

где  $m_v$  – масса объекта;  $w_v$  – ускорение объекта;  $F_v$  – равнодействующая сила;  $R_v$  – реакция силы.

Величина силы, соответственно,

$$F_v = P_{\text{расч}}/v,$$

где  $v$  – линейная скорость перемещения тяги, м/с.

**Заключение.** Полученные в результате моделирования величины напряжений являются основой для выбора размерных соотношений и номинальных параметров привода системы удаления элементов льдообразования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Способ удаления гололёда с проводов линий электропередач / С. И. Сухоруков, Д. А. Орлов, В. А. Соловьев, В. М. Козин // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 6. – С. 54-56.
2. Ратушняк, В. С. Автоматизированная система удаления льда с проводов ЛЭП: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Ратушняк Валентина Сергеевна. – Иркутск, 2021. – 178 с.
3. Титов, Д. Е. Мониторинг интенсивности гололёдообразования на воздушных линиях электропередачи и в контактных сетях: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 / Титов Дмитрий Евгеньевич. – Саратов, 2014. – 150 с.
4. Алексеенко, С. В. Численное моделирование обледенения цилиндра и профиля. Обзор моделей и результаты расчётов / С. В. Алексеенко, А. А. Приходько // Учёные записки ЦАГИ. – 2013. – № 6 (XLIV). – С. 25-57.
5. Mishchenko, L. Design of Ice-free Nanostructured Surfaces Based on Repulsion of Impacting Water Droplets / L. Mishchenko, B. Hatton, V. Bahadur et al. // American Chemical Society. – 2010. – № 4 (12). – Р. 7699-7707.
6. Патент № 2570582 Российской Федерации, МПК E04D 13/076 (2006.01). Устройство для устранения снега, наледи и сосулек с крыш зданий: № 2014116928/03: заявлено 25.04.2014; опубликовано 10.12.2015 / Беляев В. Б.; заявитель и патентообладатель Беляев Виктор Борисович. – 2 с.
7. Патент № 194796 Российской Федерации, МПК E04D 13/076 (2006.01). Устройство автоматического сброса наледи и сосулек с козырьков кровли: № 2019131155: заявлено 03.10.2019; опубликовано 24.12.2019 / Каретный А. А.; заявитель и патентообладатель Каретный Александр Анатольевич. – 2 с.
8. Совмещённые электрические машины для автоматики / Ю. М. Келим [и др.]; под общ. ред. Д. В. Свечарника. – М.: Энергия, 1969. – 200 с.
9. Соловьев, В. А. К вопросу разработки математической модели объекта взаимосвязанной системы объектного формирования / В. А. Соловьев, Н. Е. Дерюжкова, Чжо Аунг Хтет // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2017. – № II-1 (30). – С. 54-57.
10. Гринченков, В. П. Электромагнитные приводы с возвратно-поступательным и возвратно-вращательным принципом действия для клапанов / В. П. Гринченков, И. А. Павленко // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – Т. 4. – № 2. – С. 51-57.
11. Kulichenko, G. V. Assessment of efficiency of electric drive of stop valves / G. V. Kulichenko [et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – Р. 36-44. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.174203.
12. Особенности проектирования электромеханических преобразователей для систем комплексной безопасности / О. С. Амосов [и др.] // Известия вузов. Электромеханика. – 2017. – Т. 60. – № 5. – С. 5-11.
13. Иванов, С. Н. Надёжность электроснабжения: учеб. пособие / С. Н. Иванов, А. А. Скрипилев. – М.; Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. – 164 с.
14. Лидов, М. Л. Курс лекций по теоретической механике / М. Л. Лидов. – М.: Физматлит, 2010. – 495 с.

# МАШИНОСТРОЕНИЕ MECHANICAL ENGINEERING

**Сарилов М. Ю., Отряскина Т. А., Курильченко М. С.**  
**M. Yu. Sarilov, T. A. Otryaskina, M. S. Kurilchenko**

## **СЖИГАНИЕ ВОДОМАЗУТНОЙ ЭМУЛЬСИИ В КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ**

### **COMBUSTION OF WATER-OIL EMULSION IN BOILER PLANTS**

**Сарилов Михаил Юрьевич** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: Sarilov.my@knastu.ru.

**Mikhail Yu. Sarilov** – Doctor of Engineering, Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: Sarilov.my@knastu.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.

**Курильченко Максим Сергеевич** – магистрант кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: pavlovskay.2000@mail.ru.

**Maxim S. Kurilchenko** – Master's Degree Student, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: maksim080799@mail.ru.

**Аннотация.** В статье рассмотрен метод сжигания топочного мазута в виде водомазутной эмульсии с малым содержанием вредных выбросов при сжигании, что даёт положительный эффект для окружающей среды и уменьшает её загрязнение. Данная тематика является актуальной, т. к. большинство котельных использует мазут в виде топлива. Предложен способ приготовления мазута в виде водомазутной эмульсии для сжигания в паровых котельных.

**Summary.** The article considers the method of burning fuel oil in the form of a water-oil emulsion with a low content of harmful emissions during combustion, which has a positive effect on the surrounding environment and reduces its pollution. This topic is relevant, since a large number of boiler houses use fuel oil as fuel. A method for preparing fuel oil in the form of a water-oil emulsion for combustion in steam boilers is proposed.

**Ключевые слова:** водомазутная эмульсия, топочный мазут, топливо, фракции, продукты горения, температура кипения, эмульгатор мазута.

**Key words:** oil-water emulsion, fuel oil, fuel, fractions, combustion products, boiling point, fuel oil emulsifier.

УДК 66.02

Научные изыскания по снижению расходов топлива и экологичности работы мазутных котельных востребованы в данное время. Наилучшим технологическим средством достижения хороших показателей в этом вопросе может быть использование водомазутной эмульсии (ВМЭ). Исследование таких эмульсий началось ещё в Советском Союзе в начале второй половины прошлого века. При этом были опробованы многие изобретения и новшества, а практические применения, расчёты однозначно показывали, что изменение технологии подготовки топлива для котлов, конкретно применение ВМЭ, является наиболее целесообразным [1].

Основной проблемой при использовании мазута для работы котельных является отказ оборудования из-за качества мазута, что приводит к увеличению объёма его потребления и, как следствие, к большому выбросу вредных веществ (оксида азота, сажи, бензпирена), содержащихся в мазуте, в окружающую среду.

Для рассмотрения данной проблемы необходимо обратить внимание на следующие вопросы:

- При транспортировке и хранении мазут насыщается водой, а также вода конденсируется при разогреве мазута во время слива, что приводит к образованию водяных линз и неоднородности мазута. Устранение неоднородности мазута сопровождается потерями времени и дополнительными финансовыми затратами.

- В связи с повышением качества переработки нефти нефтезаводы стали выпускать более вязкий мазут с большей температурой вспышки, что в свою очередь приводит к проблемам при сжигании и хранения мазута.

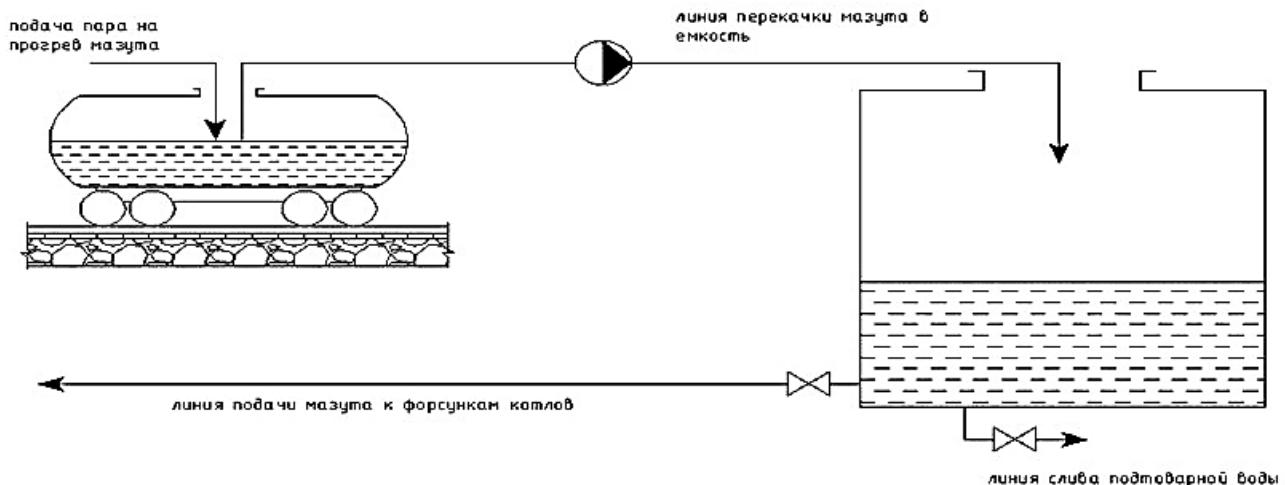


Рис. 1. Существующая схема перекачки мазута

Одним из методов решения данных вопросов является создание мелкодисперсной эмульсии, что приводило бы к уменьшению вязкости мазута и убирало бы водяные линзы. Снижение вязкости мазута позволяет снизить температуру вспышки, что в свою очередь приводит к быстрому возгоранию топлива и снижению нагрузки на оборудование во время пуска. Также снижение вязкости приводит к образованию лёгких углеводородов, что повышает коэффициент горения и снижает вредные выбросы. Отсутствие водяных линз обеспечивает постоянство факела горения, без обрывов, которые ведут к образованию свободных радикалов OH и H, что катализирует процесс горения.

Но достичь мелкодисперсной эмульсии простым смешиванием любой интенсивности воды и мазута не получается. Поэтому был сконструирован эмульгатор мазута, изображённый на рис. 2. Эмульгатор сфотографирован с разных ракурсов, он изготовлен на базе центробежного консольного насоса типа К, в котором заменено рабочее колесо на перфорированный цилиндрический диск, что позволяет получать эмульсию нужной концентрации.

В водомазутной эмульсии вода присутствует в виде частиц размером 3...16 мкм, равномерно распределённых по всему объёму мазута, при этом при эмульгировании частицы воды получают положительный электрический заряд. За счёт электрического заряда частицы воды притягивают молекулы углеводорода, что приводит к образованию мицеллы – частицы воды внутри мазутной капсулы. Мицелла – это капля воды, которую обволакивает тонкий слой мазута, своеобразная «капля в капле». Такая структура капли воды в оболочке мазута не позволяет воде объединяться в крупные капли и сохраняет ВМЭ достаточно продолжительное время (благодаря положительно заряженным частицам воды). При нагреве мицеллы во время горения вода внутри начинает вскипать, т. к. температура кипения у неё ниже, чем у мазута (разница примерно на 190 °C). Когда вода закипает и образует пар, мазут ещё находится в жидкой фазе, тем самым препятствуя испарению водяного пара. При достижении критического давления внутри мицеллы возникает микровзрыв (мазутная капсула разрушается перегретым водяным паром и рассеивается по всему объёму). Это

позволяет в несколько раз увеличить поверхность контакта мазута с кислородом, что равносильно распылению мазута под давлением 140...310 кг/см<sup>2</sup> из форсунок, приводит к качественному сжиганию мазута и уменьшает его расход, а также снижает количество вредных выбросов в атмосферу.



Рис. 2. Эмульгатор мазута

На рис. 3 представлена изменённая схема подачи мазута, где в основную цепь включён узел подачи воды, ёмкость для смешивания мазута и воды, а также после ёмкости включён разработанный эмульгатор. В дальнейшем подготовленная эмульсия подаётся на горелку под номинальным давлением 2...10 кгс/см<sup>2</sup>.

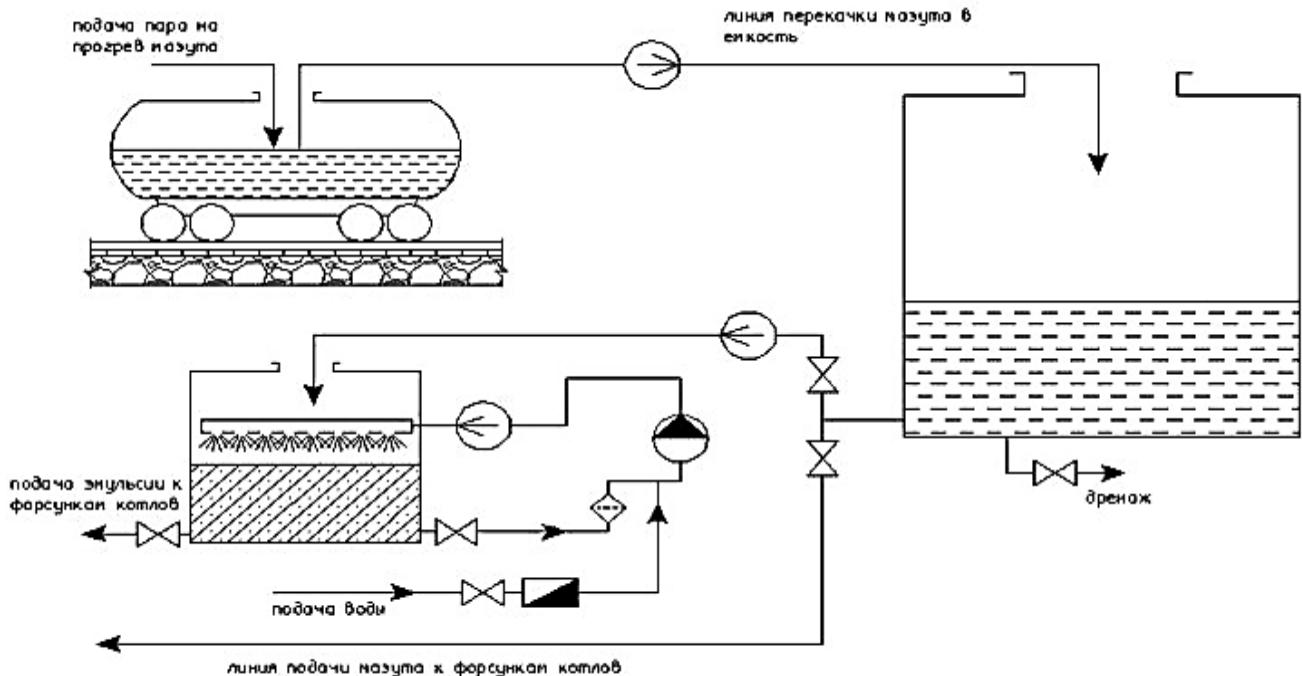


Рис. 3. Схема подготовки водомазутной эмульсии

Данный тип подготовки топлива позволяет эффективно сжигать мазут при минимальном уменьшении КПД котла и при значительном снижении вредных выбросов за счёт полного сгорания мазута. Из-за содержания воды в факеле горелки пламя приобретает синеватый оттенок [3].

**Заключение.** Применение диспергирования топочного мазута обеспечивает стабильность режимов горения и оптимизирует КПД котла за счёт следующих эффектов:

- удержание оптимальных параметров КПД котла при режимах, меньших номинальных, достигается за счёт эффекта повторного измельчения частиц эмульсии в топке;
- снижение количества воздуха в зоне работы котла уменьшает температуру точки росы уходящих газов примерно до 110 °С. Это позволяет уменьшить сернокислотную коррозию эле-

ментов котла и оборудования и увеличить КПД котла за счёт частичного возврата тепла уходящих газов;

- использование ВМЭ позволяет снизить содержание вредных веществ уходящих газов: CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> примерно в два раза, сажи – в 3...4 раза;

- возможно применение в качестве топлива горючих нефтесодержащих отходов разных химических, нефтеперерабатывающих производств, стоимость которых существенно меньше стоимости мазута. В виде эмульсий эти отходы можно сжигать без вреда для окружающей среды.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Катин, В. Д. Экологические проблемы сжигания топлива в котельных установках и перспективы их решения / В. Д. Катин // Наука и техника транспорта. – 2004. – № 2. – С. 6-11.
2. Геллер, С. В. Приготовление водомазутных эмульсий посредством волновой диспергации / С. В. Геллер // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 4. – С. 21-23.
3. Воликов, А. Н. Уничтожение замазученных вод отопительных котельных путём сжигания в виде водомазутных эмульсий / А. Н. Воликов // Промышленная энергетика. – 1999. – № 10. – С. 48-50.



**Мокрицкий Б. Я., Саблин П. А., Григорьев В. В., Шелковников В. Ю.**  
**B. Ya. Mokritskii, P. A. Sablin, V. V. Grigoryev, V. Yu. Shelkovnikov**

## КЕРАМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ НА ТВЁРДОСПЛАВНОМ ИНСТРУМЕНТЕ ДЛЯ ТОЧЕНИЯ НЕРЖАВЕЮЩИХ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ СТАЛЕЙ

### CERAMIC COATINGS ON A CARBIDE TOOL FOR TURNING STAINLESS HARD-TO-WORK STEELS

**Мокрицкий Борис Яковлевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27. E-mail: bris@knastu.ru.

**Boris Ya. Mokritskii** – Doctor of Engineering, Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: bris@knastu.ru.

**Саблин Павел Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Машиностроение» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

**Pavel A. Sablin** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 27, Lenin Pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

**Григорьев Владимир Владимирович** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: grigorev.vlv@gmail.com.

**Vladimir V. Grigoriev** – Post-Graduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: grigorev.vlv@gmail.com.

**Шелковников Вадим Юрьевич** – аспирант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Vadim Yu. Shelkovnikov** – Post-Graduate Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** Судостроительная нержавеющая сталь марки 09Х17Н7Ю применяется в различных областях машиностроения. Существующие рекомендации по обработке судостроительных сталей устарели, необходима разработка новых рекомендаций. Проведены исследования по сокращению расходов на режущий инструмент за счёт применения новых покрытий. Установлена возможность применения такого инструмента для токарной обработки сменными типовыми твёрдосплавными пластинами. Выбраны рациональные покрытия из числа известных покрытий. Разработаны новые покрытия под заданные условия эксплуатации.

**Summary.** Shipbuilding stainless steel grade 09H17N7YU is used in various fields of mechanical engineering. The existing recommendations on the processing of shipbuilding steels are outdated, new recommendations need to be developed. Studies have been conducted to reduce the cost of cutting tools through the use of new coatings. The possibility of using such a tool for turning with replaceable standard carbide plates has been established. Rational coatings are selected from among the known coatings. New coatings have been developed for the specified operating conditions.

**Ключевые слова:** многослойные покрытия, токарные сменные пластины.

**Key words:** multilayer coatings, turning replaceable plates.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-29-00393, <https://rscf.ru/project/23-29-00393/>.*

УДК 621.9

**Введение.** Востребованность в коррозионностойких материалах, способных работать в агрессивных и природных сложных условиях, растёт. Судостроение, химическая, нефтегазовая и пищевая отрасли применяют специализированные труднообрабатываемые нержавеющие стали. К таким сталим относится специализированная сталь марки 09Х17Н7Ю. На момент её разработки были соответствующие рекомендации по её обработке, сейчас они устарели. Возникла необходимость в разработке новых рекомендаций применительно к современным условиям, в том числе для высокопроизводительной обработки.

Имеющиеся публикации по обработке такой стали не систематизированы и не позволяют разработать рекомендации для современного уровня производства. Возникла необходимость в разработке рекомендаций по применению покрытий для металлорежущего инструмента с целью сокращения инструментальных затрат.

Ниже приведены отдельные результаты по разработке упрочняющих покрытий для твёрдо-сплавных сменных пластин применительно к токарным резцам для указанной стали. Результаты приведены применительно к продольному точению квадратными сменными пластинами (по ГОСТ 24248-80 их цифровое обозначение 03125, буквенное обозначение SNMG) с центральным отверстием. Режимы резания назначались следующие: глубина резания  $t = 1$  мм; подача  $s = 0,21$  мм/об; скорость резания  $V = 50$  м/мин.

**Обсуждение полученных результатов.** Сталь марки 09Х17Н7Ю (ГОСТ 5632-2014 на материал и ГОСТ 7350-77 на сортамент проката) является труднообрабатываемой нержавеющей сталью. Значительное количество хрома (16...17,5 %) и никеля (7...8 %) затрудняет обработку резанием этой стали.

В качестве сравнения с этой сталью выполнены исследования для других труднообрабатываемых нержавеющих сталей марок 13Х15Н5 АМ-3 и 12Х18Н10Т.

Использован следующий подход к решению проблемы:

1. В качестве виртуального моделирования процесса резания использовались подходы имитационного моделирования. В качестве объекта моделирования рассматривался процесс токарной обработки труднообрабатываемых нержавеющих сталей 09Х17Н7Ю; 13Х15Н5 АМ-3 и 12Х18Н10Т. Основное внимание уделялось процессам, протекающим в зоне резания.

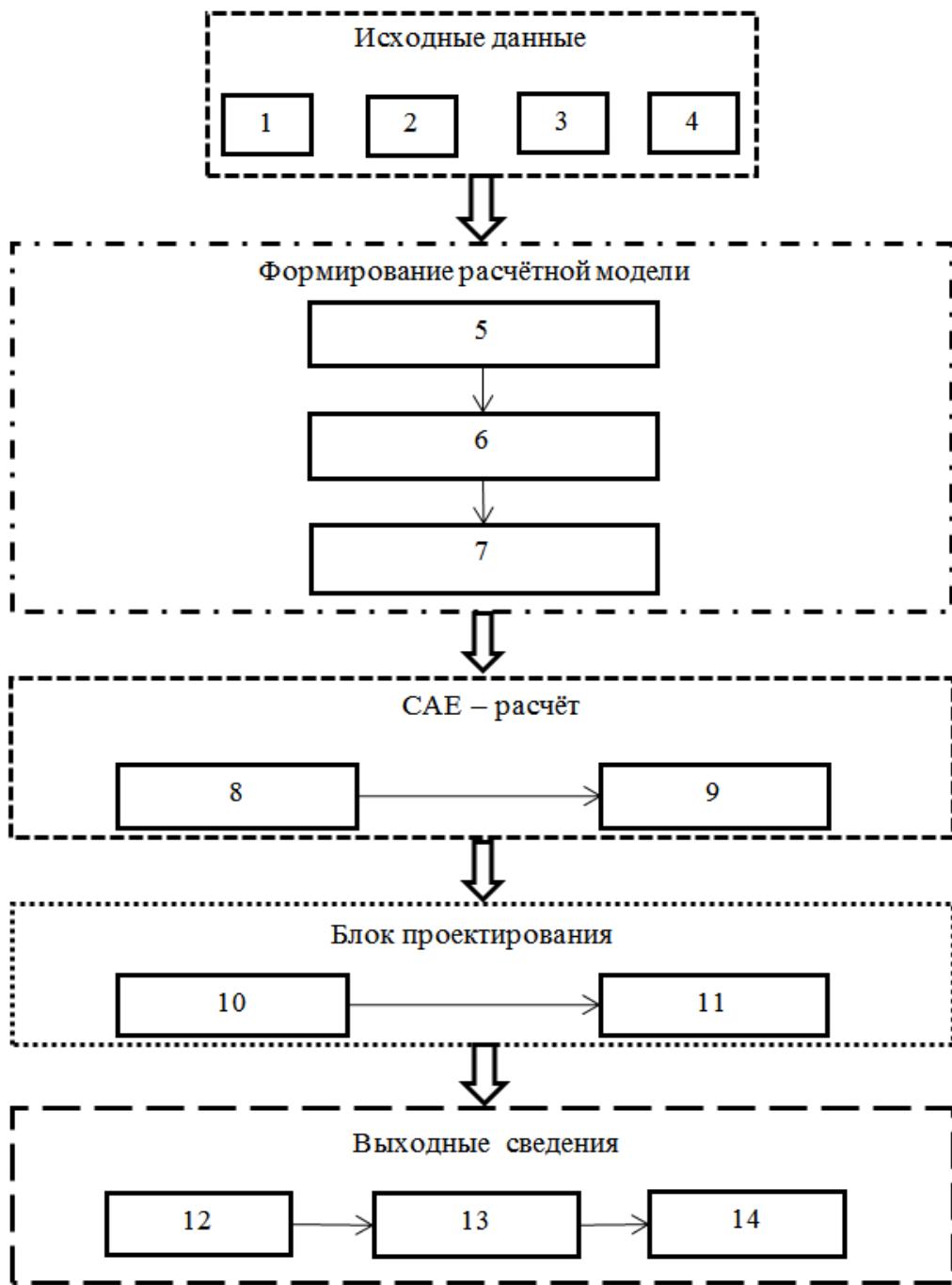
2. В ходе имитационного моделирования нами изучалось сложнонапряжённое состояние режущего инструмента, при этом учитывалась сила резания.

3. Имитационное моделирование проводилось в программной среде Deform. В начале моделирования в качестве исходных данных для программы Deform использовались выходные параметры оценки сложнонапряжённого состояния режущего инструмента. Данные параметры должны быть подтверждены экспериментальными данными. При этом результатом имитационного моделирования должны стать рекомендации по выбору режущего инструмента, режимов механической обработки и алгоритма проектирования нового покрытия на режущий инструмент для заданных условий эксплуатации.

Алгоритм виртуального моделирования приведён на рис. 1.

В ходе проведения эксперимента удалось установить влияние различного покрытия на режущем инструменте на силу резания. Для проведения натурных экспериментов использовался лабораторный динамометр со специализированным программным обеспечением (см. рис. 2). Данный лабораторный стенд регистрирует силу резания по её составляющим:  $P_x$  – продольная;  $P_y$  – радиальная;  $P_z$  – вертикальная.

В ходе проведения эксперимента стало понятно, что значения составляющих сил резания при применении различных инструментальных материалов существенно отличаются [1]. Результаты экспериментальных данных для различных обрабатываемых материалов приведены в табл. 1.



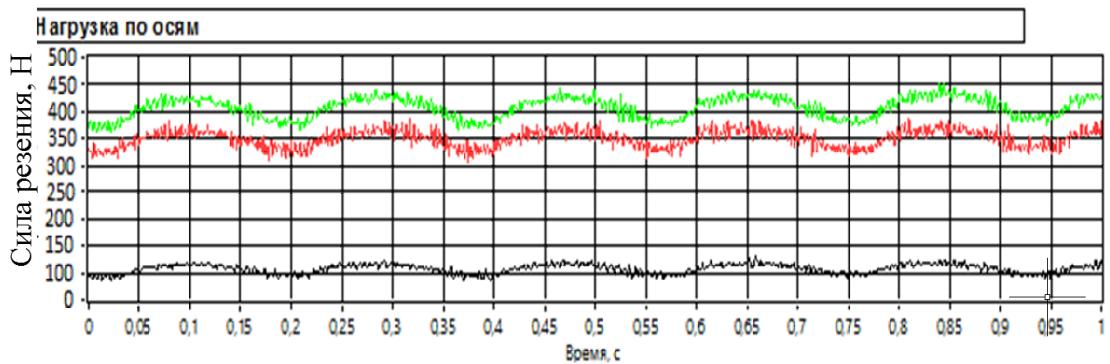
1 – характеристики оборудования; 2 – физико-технические характеристики обрабатываемого материала; 3 – физико-технические характеристики инструментального материала; 4 – выходные параметры процесса резания; 5 – моделирование твёрдотельных объектов обработки; 6 – конечно-элементное моделирование обрабатываемой заготовки и режущего инструмента; 7 – задание экстремумов и выходных параметров моделирования; 8 – расчёт выходных параметров процесса обработки; 9 – обработка входных параметров; 10 – разработка рекомендаций по созданию состава и архитектуры упрочняющего покрытия и рекомендаций по подбору режимов резания; 11 – разработка нового покрытия для режущего инструмента; 12 – построение диаграмм по результатам моделирования; 13 – сохранение результатов; 14 – формирование базы данных

Рис. 1. Алгоритм реализации виртуальной модели

а)



б)



в)

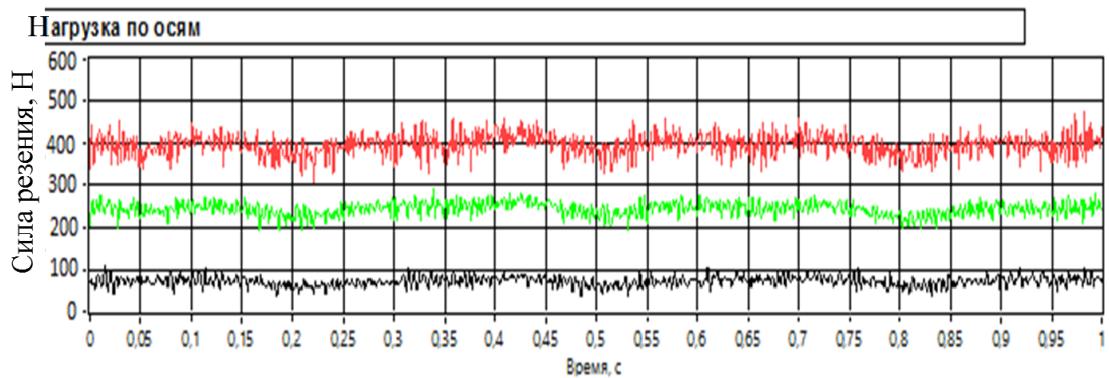


Рис. 2. Лабораторный стенд по исследованию сил резания при точении, основанный на динамометре STD201-2 (а); графики составляющих сил резания при обработке инструментальным материалом BK8+TiN(2 мкм)+TiC(5 мкм), где верхняя линия –  $P_y$ , средняя –  $P_z$ , нижняя –  $P_x$  (б); графики составляющих сил резания при обработке инструментальным материалом BK8+TiCN(0,5 мкм)+TiN(1 мкм), где верхняя линия –  $P_z$ , средняя линия –  $P_y$ , нижняя –  $P_x$  (в)

Из табл. 1 видно, что в зависимости от материала заготовки силы резания настолько разные, что позволяют нам идентифицировать режущий инструмент (с покрытием или без).

В ходе виртуального моделирования было спроектировано более 30 новых покрытий, которые повышают период стойкости режущего инструмента в несколько раз [2; 3]. В данных работах мы показываем, что наиболее эффективными при экспериментальной проверке оказались инструментальные материалы, указанные в табл. 2.



Усреднённые результаты экспериментальных исследований

| Составляющие силы резания | Материал заготовки |          |             |
|---------------------------|--------------------|----------|-------------|
|                           | 12Х18Н10Т          | 09Х17Н7Ю | 13Х15Н АМ-3 |
| $F_x$ , Н                 | 66,7               | 87,5     | 33,2        |
| $F_y$ , Н                 | 310,0              | 303,2    | 312,1       |
| $F_z$ , Н                 | 282,6              | 362,0    | 193,4       |

Таблица 2

Прирост периода стойкости режущего инструмента с разработанными износостойкими покрытиями при обработке нержавеющей стали 09Х17Н7Ю

| Упрочняющее керамическое покрытие на инструментальном материале ВК8                 | Изменение периода стойкости |           |
|---|-----------------------------|-----------|
|   | кратно (в разы)             | в минутах |
| Режимы резания: $t = 1$ мм; $V = 50$ м/мин; $s = 0,021$ мм/об                       |                             |           |
| TiCN → (TiAl)N → Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> → TiC                               | 3,09                        | 139       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> → (Ti)CN → (TiAl)N → TiN                             | 2,89                        | 129       |
| (TiAl)N → Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> → (TiAl)N → Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,79                        | 124       |
| TiCN → (TiAl)N → Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> → TiC                               | 2,59                        | 123       |

В ходе проведения экспериментов установлено, что шероховатость обработанной поверхности существенно зависит от состава и архитектуры упрочняющего покрытия. Экспериментальные данные, полученные при точении нержавеющей стали 09Х17Н7Ю, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение результатов шероховатости поверхности при обработке заготовки 09Х17Н7Ю инструментом ВК8 без покрытия и с нанесённым керамическим покрытием

| Упрочняющее керамическое покрытие на инструментальном материале ВК8                 | Параметр шероховатости | Значения соотношения B1/B2* параметров |
|---|------------------------|--|
| TiCN → (TiAl)N → Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> → TiC                               | Ra                     | 1,51                                   |
|   | Rz                     | 1,30                                   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> → (Ti)CN → (TiAl)N → TiN                             | Ra                     | 1,31                                   |
|   | Rz                     | 1,19                                   |
| (TiAl)N → Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> → (TiAl)N → Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Ra                     | 1,20                                   |
|   | Rz                     | 1,09                                   |
| TiN → TiC → TiN → TiC   | Ra                     | 1,20                                   |
|   | Rz                     | 1,10                                   |
| TiC → TiN → (TiAl)N   | Ra                     | 1,09                                   |
|   | Rz                     | 1,05                                   |
| TiCN → TiC → TiN  | Ra                     | 1,20                                   |
|   | Rz                     | 1,10                                   |
| TiC → TiN   | Ra                     | 1,09                                   |
|   | Rz                     | 1,07                                   |
| TiN → TiC   | Ra                     | 1,08                                   |
|   | Rz                     | 1,06                                   |
| TiCN → TiN  | Ra                     | 1,07                                   |
|   | Rz                     | 1,02                                   |

Кроме распространённых параметров шероховатости  $Ra$  и  $Rz$ , нами также были исследованы четыре дополнительных параметра  $R3z$ ,  $Rp$ ,  $Rq$ ,  $Rt$ , которые характеризуют особые свойства шероховатости обработанной поверхности. Из табл. 3 видно, что все разработанные упрочняющие керамические покрытия на режущий инструмент приводят к повышению качества обработанной поверхности ( $B1/B2 > 1$ ). В частном случае данный коэффициент достигает 1,51, т. е. высота микронеровностей (шероховатость поверхности) снизилась на 51 %. Данные табл. 3 позволяют подобрать режущий инструмент с упрочняющим покрытием, который обеспечит заданные требования шероховатости поверхности даже для труднообрабатываемой стали 09Х17Н7Ю. Для сталей 12Х18Н10Т и 13Х15Н5 АМ-3 соотношение  $B1/B2$  имеет значительно большие значения. Для данных сталей наиболее рациональными по составу и архитектуре являются следующие режущие инструменты:  $BK8 + TiCN \rightarrow (TiAl)N \rightarrow Al_2O_3 \rightarrow TiC$  и  $BK8 + Al_2O_3 \rightarrow (Ti)CN \rightarrow (TiAl)N \rightarrow TiN$ .

На рис. 3 показано, что при применении упрочняющих керамических покрытий стойкость режущего инструмента возрастает со 120 до 150 мин (при обработке стали 13Х15Н5 АМ-3) и с 90 до 140 мин (при обработке стали 12Х18Н10Т) в сравнении с применением инструмента BK8 без покрытия. Здесь применялось покрытие  $Ti \rightarrow TiN \rightarrow (TiAl)N$ .

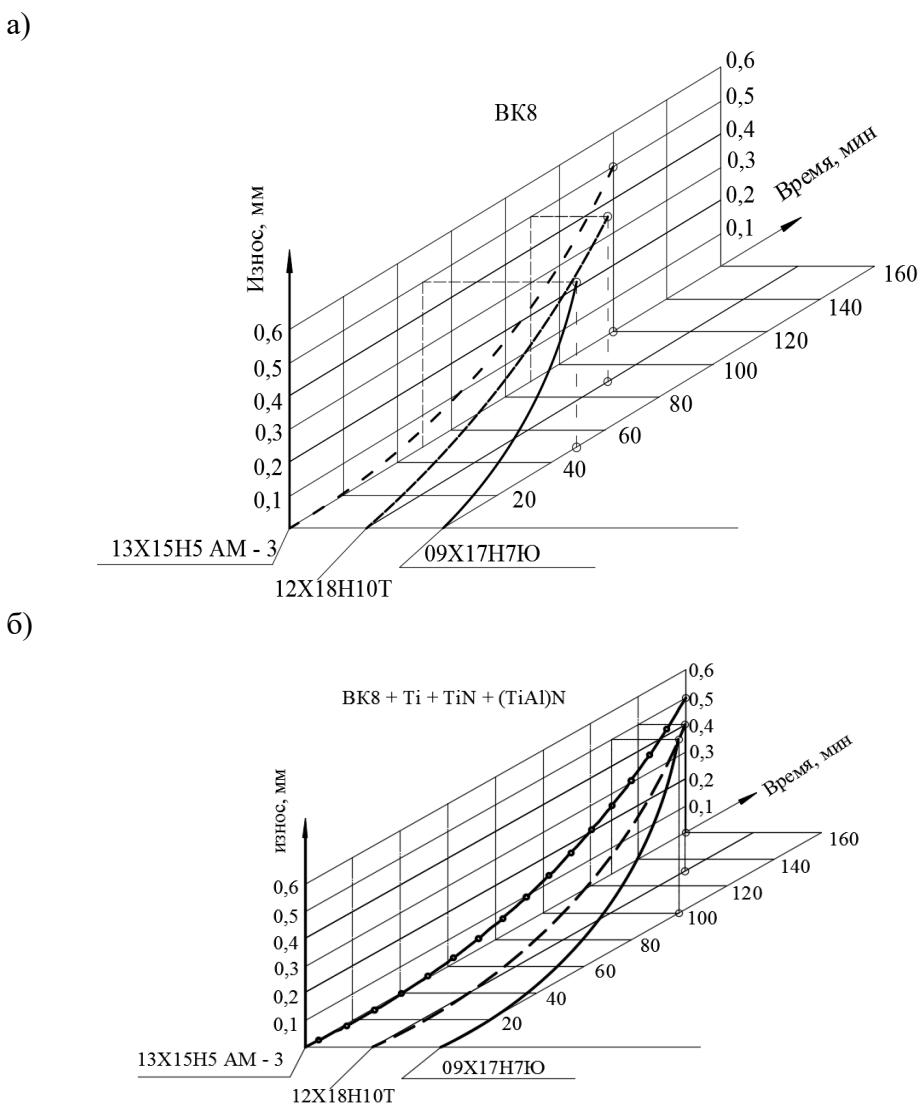


Рис. 3. Периоды стойкости режущего инструмента (BK8) без упрочняющего покрытия (а) и с нанесённым керамическим покрытием при точении различных труднообрабатываемых сталей (величина износа 0,5 мм) (б)

Применение режущего инструмента BK8 со следующей архитектурой и составом покрытия  $\text{TiCN} \rightarrow (\text{TiAl})\text{N} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{TiC}$  при обработке стали 13Х15Н5 АМ-3 позволяет повысить период стойкости с 90 до 185 мин. Для стали 13Х15Н5 АМ-3 применение инструмента с данным покрытием является наиболее рациональным.

В целом, полученные результаты не противоречат результатам других исследователей [4–9].

На рис. 4 показан уровень совпадения прогнозируемых и экспериментальных данных по параметрам (температура, напряжения, деформация, износ). Этот рисунок характеризует закономерность изменения выходных параметров процесса токарной обработки стали 09Х17Н7Ю (режимы резания:  $V = 50$  м/мин,  $t = 1$  мм,  $S_{\text{об}} = 0,21$  мм/об) разными инструментами.

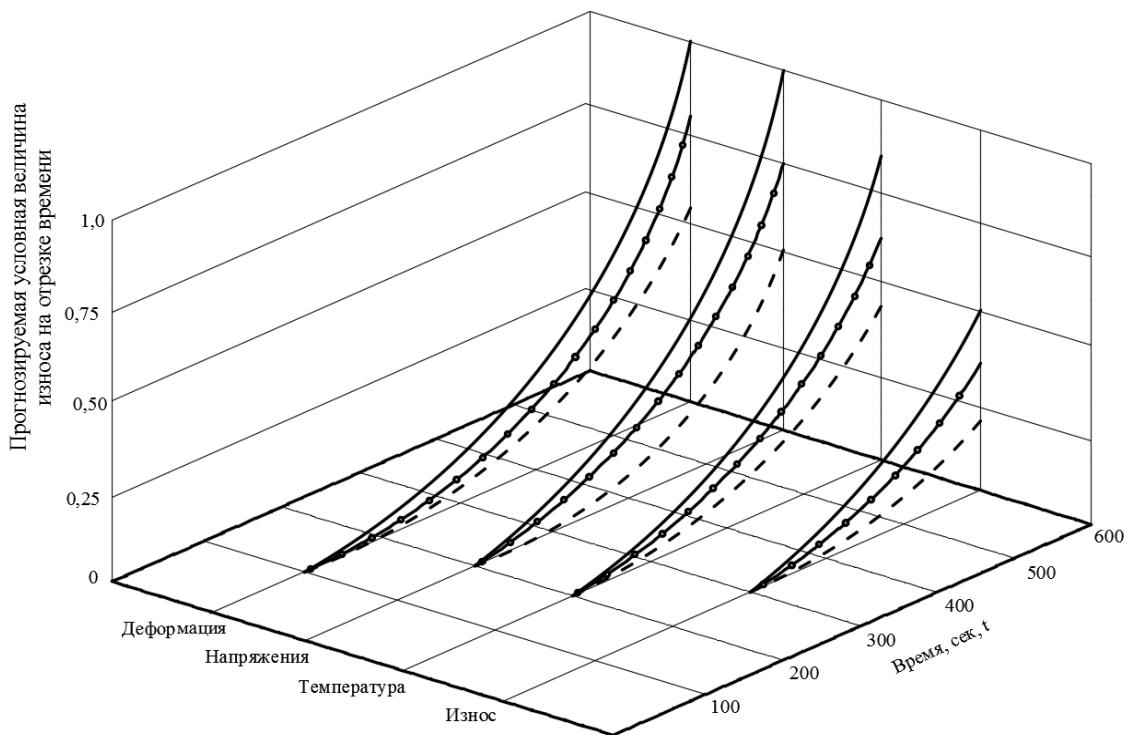


Рис. 4. Результаты имитационного моделирования выходных параметров процесса резания при использовании: сплошная линия – инструмент BK8 без покрытия; сплошная с точками – инструмент BK8 с покрытием  $\text{TiCN} \rightarrow \text{TiN}$ ; штриховая линия – инструмент BK8 с покрытием  $\text{TiC} \rightarrow \text{TiN} \rightarrow (\text{TiAl})\text{N}$

Вертикальная ось (условный износ) ограничивается единицей (см. рис. 4). Из графика следует, что наилучший вариант покрытия (из рассмотренных) на инструментальный материал BK8, обеспечивающий максимальную стойкость, является  $\text{TiC} \rightarrow \text{TiN} \rightarrow (\text{TiAl})\text{N}$ . Причём время его стойкости увеличивается более чем в 2 раза в сравнении с инструментом без покрытия и в 1,4 раза в сравнении с покрытием  $\text{TiCN} \rightarrow \text{TiN}$ . Тенденции в изменении других параметров аналогичны изменению параметра «износ».

Имитационное моделирование прошло более чем 30 вариантов упрочняющих керамических покрытий для режущего инструмента. Далее приведены режущие инструменты BK8 с разработанными упрочняющими покрытиями, расположенные в порядке убывания периода стойкости при обработке труднообрабатываемых нержавеющих сталей:

1.  $\text{TiCN} \rightarrow (\text{TiAl})\text{N} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{TiC}$ ;
2.  $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow (\text{TiCN} \rightarrow (\text{TiAl})\text{N} \rightarrow \text{TiN})$ ;
3.  $(\text{TiAL})\text{N} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow (\text{TiAl})\text{N} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3$ ;
4.  $\text{TiN} \rightarrow \text{TiC} \rightarrow \text{TiN} \rightarrow \text{TiC}$ ;

5.  $TiC \rightarrow TiN \rightarrow (TiAl)N$ ;
6.  $TiCN \rightarrow TiC \rightarrow TiN$ ;
7.  $TiC \rightarrow TiN$ ;
8.  $TiN \rightarrow TiC$ ;
9.  $TiCN \rightarrow TiN$ ;
10. Инструмент без покрытия.

**Заключение.** По совокупности полученных результатов сделаны следующие прогнозные выводы:

1. В результате имитационного моделирования предложенные упрочняющие керамические покрытия позволяют повысить период стойкости режущего инструмента с 45 мин (ВК8 без покрытия) до 140...180 мин.
2. При обработке стали 09Х17Н7Ю инструментом ВК8 без покрытия период стойкости режущего инструмента будет минимален. При точении стали 13Х15Н5 АМ-3 – максимален.
3. Качество обработанной поверхности при оценке параметров её шероховатости тоже существенно зависит от применяемого покрытия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Управление шероховатостью поверхности при обработке заготовок из труднообрабатываемых и упрочнённых материалов / П. А. Саблин, В. С. Щетинин, Б. Я. Мокрицкий, М. С. Юрченко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2023. – Т. 19. – № 2 (218). – С. 59-63.
2. Мокрицкий, Б. Я. Применение покрытий для создания инструментальных материалов: моногр. / Б. Я. Мокрицкий, Е. В. Безолукова, Э. С. Ситамов. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2019. – 118 с.
3. Мокрицкий, Б. Я. Повышение работоспособности твёрдосплавного режущего инструмента за счёт нанесения покрытий / Б. Я. Мокрицкий, Э. С. Ситамов, А. Г. Серебренникова // Вестник ИрГТУ. – 2019. – Т. 23. – № 2. – С. 246-251.
4. Alexey Vereschaka, Boris Mokritskii, Elena Mokritskaya, Oleg Sharipov and Maksim Oganyan. Two-component end mills with multilayer composite nano-structured coatings as a viable alternative to monolithic carbide end mills // Mechanics & Industry 18, 705 (2017), © AFM, EDP Sciences 2017, <https://doi.org/10.1051/meca/2017052>.
5. A. A. Vereschaka, M. A. Volosova, S. N. Grigoriev, A. S. Vereschaka, Development of wear-resistant complex for high-speed steel tool when using process of combined cathodic vacuum arc deposition, Procedia CIRP 9 (2013) p.p. 8–12, doi:10.1016/j.procir.2013.06.159.
6. A. Vereschaka, M. A. Volosova, A. D. Batako, A. S. Vereschaka, B. Y. Mokritskii, Development of wear-resistant coatings compounds for high-speed steel tool using a combined cathodic vacuum arc deposition, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 84 (2016) p. 1471-1482, doi:10.1007/s00170-015-7808-5.
7. A. O. Volkhonskii, A. A. Vereshchaka, I. V. Blinkov, A. S. Vereshchaka, A. D. Batako, Filtered cathodic vacuum arc deposition of nano-layered composite coatings for machining hard-to-cut materials, Int. J. Adv. Manuf. Technol. 84 (2016) p. 1647–1660, doi:10.1007/s00170-015-7821-8.
8. Григорьев, С. Н. Технологические методы повышения износостойкости контактных площадок режущего инструмента: моногр. / С. Н. Григорьев, В. П. Табаков, М. А. Волосова. – Старый Оскол: ТНТ, 2011. – 380 с.
9. 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.



Джемилов Э. Ш., Джемалядинов Р. М., Курманов Р. Д., Сейдалиев Р. С.  
E. Sh. Dzhemilov, R. M. Dzhemalyadinov, R. D. Kurmanov, R. S. Seydaliev

## ПРИМЕНЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ СОТС ПРИ ОБРАБОТКЕ КОНИЧЕСКИХ ОТВЕРСТИЙ АЛМАЗНЫМ ХОНИНГОВАНИЕМ

### SAFE SOTS FOR TAPERED HOLE MACHINING BY DIAMOND HONING

Джемилов Эшреб Шефикович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой технологии машиностроения Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (Россия, Симферополь). E-mail: eshreb@mail.ru.

**Eshreb Sh. Dzhemilov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of Mechanical Engineering Technology Department, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (Russia, Simferopol). E-mail: eshreb@mail.ru.

Джемалядинов Руслан Марленович – преподаватель кафедры технологии машиностроения Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (Россия, Симферополь). E-mail: rus.dzhemalyadinov@mail.ru.

**Ruslan M. Dzhemaluyadinov** – Lecturer, Mechanical Engineering Technology Department, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (Russia, Simferopol). E-mail: rus.dzhemalyadinov@mail.ru.

Курманов Ресуль Диляверович – аспирант Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (Россия, Симферополь). E-mail: kurmanov.77@mail.ru.

**Resul D. Kurmanov** – Post-Graduate Student, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (Russia, Simferopol). E-mail: kurmanov.77@mail.ru.

Сейдалиев Рефат Саидович – аспирант Крымского инженерно-педагогического университета имени Февзи Якубова (Россия, Симферополь).

**Refat S. Seydaliev** – Post-Graduate Student, Crimean Engineering and Pedagogical University named after Fevzi Yakubov (Russia, Simferopol).

**Аннотация.** Одним из наиболее производительных процессов финишной обработки отверстий является алмазное хонингование, обладающее способностью снятия больших припусков и исправления погрешностей геометрической формы, сформированных на предшествующих операциях. Использование алмазного хонингования для обработки конических отверстий в изделиях с сопрягаемыми поверхностями имеет актуальное значение. Процесс хонингования конических отверстий недостаточно изучен. Кинематика данного процесса обработки состоит из четырёх основных движений: комбинированное движение резания – вращательное  $V_{окр}$  и возвратно-поступательное  $V_{в-п}$ ; комбинированное движение брусков – радиальное возвратно-поступательное  $V_{в-п.рад}$ ; возвратно-поступательное движение брусков вдоль образующей  $V_{в-п.бр}$ , которое обеспечивает постоянный контакт рабочей поверхности инструмента с деталью. После каждого двойного хода инструмента осуществляется дозированная подача брусков  $S_{рад}$ . На основе исследований, направленных на обеспечение равномерного распределения контактного давления между поверхностью бруска и детали из-за переменной площади контакта и количества зёрен, участвующих в резании, создана конструкция инструмента, обеспечивающего повышение точности обработки конических отверстий хонингованием. Проведённые исследования, характеризующие качество поверхности при хонинговании конических отверстий бруском с характеристикой АС6 500/400-М5-01-100 % с использованием инструмента, оснащённого как традиционной, так и экспериментальной колодками, где в качестве смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) использовался керосин, показали, что отклонение от круглости уменьшилось в 1,7 раз; отклонение прямолинейности уменьшилось в 1,8 раз; отклонение угла конуса уменьшилось в 1,6 раз; параметры шероховатости вдоль образующей конического отверстия составили  $Ra = 5,73...5,9$  мкм против  $Ra = 4,09...5,99$  мкм. В статье представлены результаты экспериментов с использованием безопасного состава СОЖ – НСК-5 как альтернативы керосину, вызывающему аллергические реакции у оператора.

**Summary.** One of the most productive hole finishing processes is diamond honing, which has the ability to remove large allowances and correct geometric shape errors formed in previous operations. The use of diamond honing for the machining of conical holes in products with mating surfaces is of current importance. The process of honing conical bores is insufficiently studied. The kinematics of this machining process consists of four main movements: the combined cut-ting movement - rotational  $V_{\text{mov}}$  and reciprocating  $V_{r-t}$ ; the combined movement of the bars - the radial reciprocating movement of the bars  $V_{r-t}$  rad.; reciprocating movement of the bars along the generatrix  $V_{r-t \text{ bar}}$ , which ensures constant contact of the working surface of the tool with the part. After each double stroke of the tool, a metered supply of  $S_{\text{rad}}$  bars is carried out. Based on researches aimed at providing even distribution of contact pressure between the surface of a stone and a workpiece because of variable contact area and number of grains involved in cutting the design of a tool providing increase of accuracy of honing processing of tapered bores was created. The research performed to characterize the surface quality at honing of conical bores using a stone with characteristics AC6 500/400-M5-01-100 % with the tools equipped with both conventional and experimental blocks, where kerosene was used as a lubricant-coolant, showed that the deviation from roundness decreased by 1,7 times; deviation of straightness decreased 1,8 times; deviation of cone angle decreased 1,6 times; roughness parameters along the formative of a cone hole made  $R_a = 5,73 \dots 5,9 \mu\text{m}$  vs.  $R_a = 4,09 \dots 5,99 \mu\text{m}$ . The paper presents the results of experiments with the use of a safe coolant composition - NSC-5 as an alternative to kerosene, which causes allergic reactions in the operator.

**Ключевые слова:** алмазное хонингование, конические отверстия, контактные давления, прямолинейность образующей, круглость, шероховатость.

**Key words:** diamond honing, tapered holes, contact pressures, straightness of the generatrix, roundness, roughness.

УДК 621.923

**Введение.** Обеспечение высокого качества деталей является одной из основных задач, стоящих перед машиностроителями, реализация которых базируется в совершенствовании методов механической обработки с использованием нераскрытых внутренних ресурсов технологической системы.

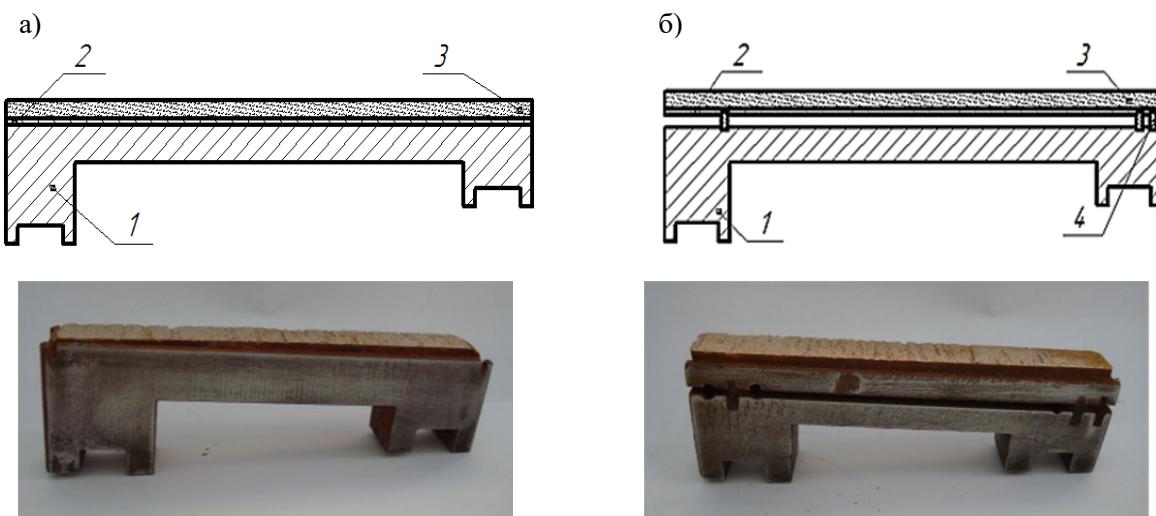
Известно, что финишные методы обработки способствуют исправлению размерных погрешностей, полученных на предшествующих операциях, обеспечивают требуемую шероховатость поверхности. Получение внутренних поверхностей в сравнении с наружными поверхностями является трудоёмким процессом. Следует отметить, что не все методы на этапе финишной обработки обеспечивают заданные точность и качество. Например, при внутреннем шлифовании консольно-расположенный инструмент подвергается упругому отжатию, а появление прижогов на обрабатываемой поверхности из-за высоких температур, связанных со скоростями резания, приводит к изменению структуры поверхностного слоя материала.

Одним из прогрессивных методов финишной обработки отверстий является хонингование, где можно использовать бруски с содержанием абразива (синтетического алмаза, кубического нитрида бора) и различными характеристиками зёрен для обеспечения заданной микроструктуры на обрабатываемой поверхности. Обработка отверстий хонингованием с использованием алмазных брусков сопровождается снятием минимальных припусков и возможностью управления процессом для создания микротопографии на поверхности, структура которой остаётся неизменной из-за низких температур (до 90 °C) в зоне резания.

Изделия с сопрягаемыми поверхностями, работающие под высоким давлением (до 50 МПа), применяют для обеспечения герметичности перекрытия и используются в различных отраслях промышленности. Наиболее часто подобные сопряжения имеют форму конуса. К таким изделиям относятся дозаторы в автоматических линиях, используемых на предприятиях пищевой отрасли, пробковые краны трубопроводов и фонтанной арматуры в газовой и нефтехимической промышленности.

Обработка хонингованием конических отверстий является сложным технологическим процессом. Из-за изменения диаметра на длине образующей конуса в хонинговальной головке бруски совершают дополнительное движение – радиальное возвратно-поступательное, которое является

обязательным условием. Если при хонинговании цилиндрических отверстий площадь контакта бруска с деталью постоянна, то хонингование конического отверстия протекает при постоянном изменении площади контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью, что приводит к неравномерному съёму припуска. В результате проведения исследований контактного взаимодействия инструмента с деталью было достигнуто равномерное распределение давления на всей длине бруска и предложена экспериментальная конструкция колодки как элемента хонинговальной головки (см. рис. 1), которая позволила обеспечить равномерный съём припуска [1].



1 – корпус; 2 – подложка; 3 – алмазный бруск; 4 – опорная планка  
Рис. 1. Конструкция колодки: а – традиционная; б – экспериментальная

Несмотря на невысокие температуры в контактной зоне, процесс снятия припуска должен проходить с применением смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), превалирующим эффектом которой должна выступать моющая функция [2]. Большинство применяемых на сегодняшний день составов СОЖ для абразивной обработки это водные эмульсии с добавлением различных поверхностно-активных веществ (ПАВ) [3–5]. Как показывает практика, такие составы имеют неплохие результаты, однако изначально при хонинговании, особенно при обработке чугунов, в качестве СОЖ применялся керосин или смесь керосина с минеральными маслами, которые позволяют эффективно вымывать образующуюся мелкодисперсную стружку и не подвергать элементы системы станок-приспособление-инструмент-заготовка (СПИЗ) коррозии [6; 7].

Отказ от применения керосиносодержащих составов СОЖ был обусловлен рядом негативных факторов, среди которых высокая пожароопасность и, что самое главное, раздражение кожных покровов у операторов, обслуживающих данное оборудование [8].

Современные требования к экологизации производства привели к поиску новых составов, которые бы не уступали по своим физико-механическим характеристикам и в то же время оставались безопасными для здоровья рабочего и позволяли существенно снизить стоимость утилизации отработанных СОЖ [9–11].

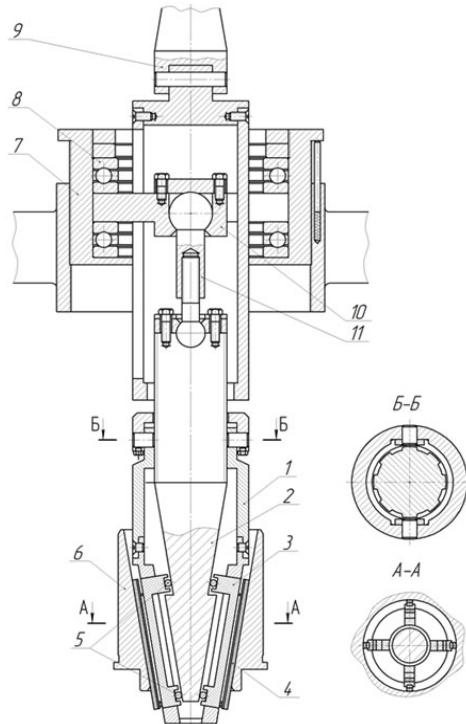
В данной статье при проведении экспериментальных исследований в качестве СОЖ использовался керосин как исходный состав, а также предлагаемый состав 5-процентного водного раствора натриевой соли кислого гудрона (НСК-5).

**Методика проведения эксперимента.** Исследования проводились на радиально-сверлильном станке мод. 2К522, дополнительно оснащённом кривошипно-шатунным механизмом, обеспечивающим бесступенчатое возвратно-поступательное движение шпинделя в автоматическом режиме, что является обязательным условием для процесса хонингования (см. рис. 2). Обрабатываемый материал – сталь 40Х улучшенная (HRC 42...52) по ГОСТ 4543-2016, используемый для корпуса дозатора дозировочно-укупорочного агрегата Б4-КрП-1 50.10.013, имеющего кониче-

ское отверстие с углом конуса  $25^\circ$ . Для проведения экспериментов разработана хонинговальная головка (см. рис. 3), в которой были установлены алмазные бруски с характеристикой АС6 500/400-М5-01-100%. Установленные режимы резания: окружная скорость –  $V_{ок} = 45$  м/мин; скорость возвратно-поступательного движения –  $V_{в-п} = 10$  м/мин. В качестве СОЖ использовался на водной основе НСК-5 (см. табл. 1), который обладает хорошими моющими, антикоррозионными и консервационными свойствами, повышенной поверхностной активностью и облегчает процесс резания, повышает интенсивность съёма металла, уменьшает удельный расход алмазов.



Рис. 2. Радиально-сверлильный станок  
мод. 2К522



1 – корпус; 2 – шток разжимной; 3 – колодка;  
4 – алмазный бруск; 5 – ролик;  
6 – обрабатываемая деталь; 7 – стакан ограничителя;  
8 – подшипник упорный; 9 – конусный соединительный наконечник;  
10 – крестовина; 11 – шарнир

Рис. 3. Хонинговальная головка для обработки  
конических отверстий

#### Химический состав СОЖ НСК-5

в процентах (мас.)

| Натриевая соль кислого гудрона | Тетраборнокислый натрий | Натрий азотнокислый | Триэтаноламин | Вода |
|--------------------------------|-------------------------|---------------------|---------------|------|
| 3                              | 0,25                    | 0,25                | 1,5           | 95   |

После хонингования проводится контроль полученных поверхностей при измерении отклонений прямолинейности образующей и круглости, а также шероховатости обработанной поверхности.

**Результаты и их обсуждение.** Фактические линии прямолинейности образующей конического отверстия после обработки традиционной и экспериментальной колодками, полученные в результате измерений в 5 точках, представлены на рис. 4.

Таблица 1

Химический состав СОЖ НСК-5

в процентах (мас.)

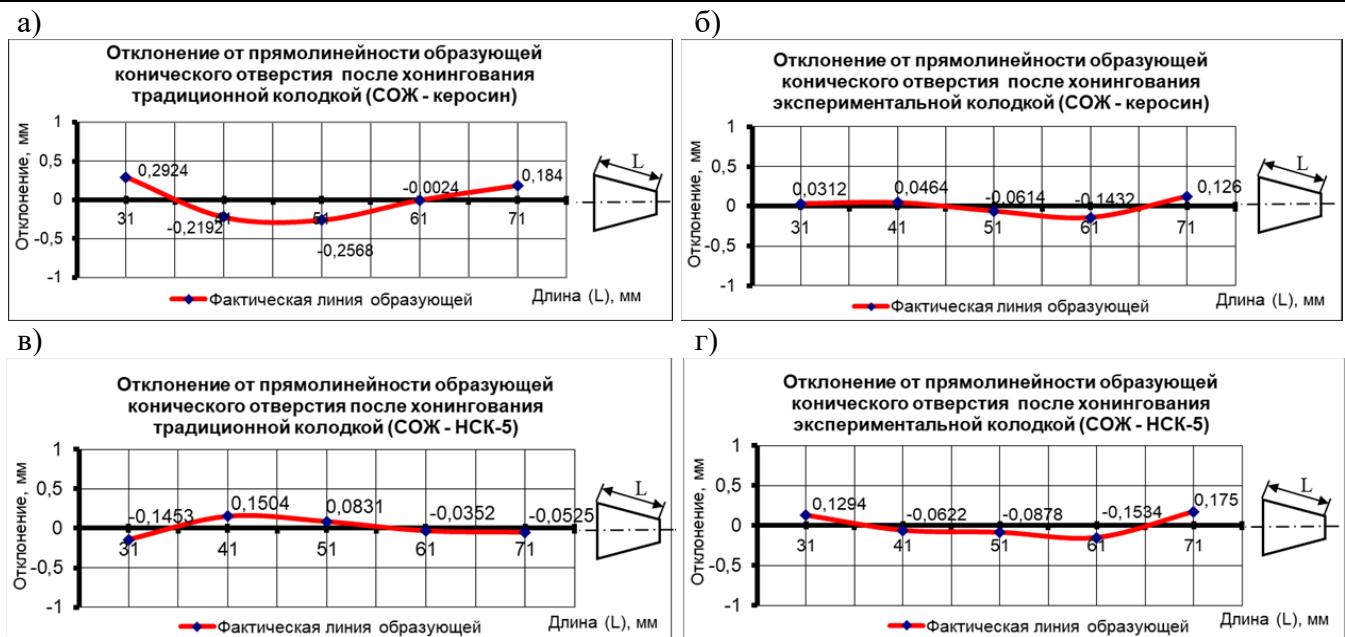


Рис. 4. Отклонение от прямолинейности образующей конического отверстия после хонингования алмазным бруском АС6 500/400-М5-01-100% с использованием:  
а – традиционной колодки (СОЖ – керосин); б – экспериментальной колодки (СОЖ – керосин);  
в – традиционной колодки (СОЖ – НСК-5); г – экспериментальной колодки (СОЖ – НСК-5)

Графики показывают уменьшение отклонения прямолинейности образующей конического отверстия при хонинговании экспериментальной колодкой, что связано с выравниванием контактных давлений на длине алмазного бруска, а также возможностью применения НСК-5, действие которой в процессе обработки аналогично керосину.

По полученным результатам измерений отклонений от круглости конического отверстия в поперечном сечении построены круглограммы (см. рис. 5).

Круглограммы показывают эффективность хонингования в среде НСК-5 при оснащении инструмента экспериментальной колодкой.

В процессе исследования микрографии обработанной поверхности конического отверстия с углом конуса 25° после хонингования алмазными брусками АС6 500/400-М5-01-100% с использованием в инструменте традиционной и экспериментальной колодок было установлено, что величина параметров шероховатости возрастает при перемещении от меньшего диаметра отверстия к большему (см. рис. 6).

Полученные результаты шероховатости показывают, что экспериментальная конструкция колодки в сочетании с НСК-5 при хонинговании создаёт благоприятные условия для получения равной микрографии поверхности образующей конического отверстия. Параметры шероховатости при обработке с НСК-5 составили  $R_a = 5,488 \dots 5,593$  мкм против  $R_a = 5,73 \dots 5,895$  мкм с керосином.

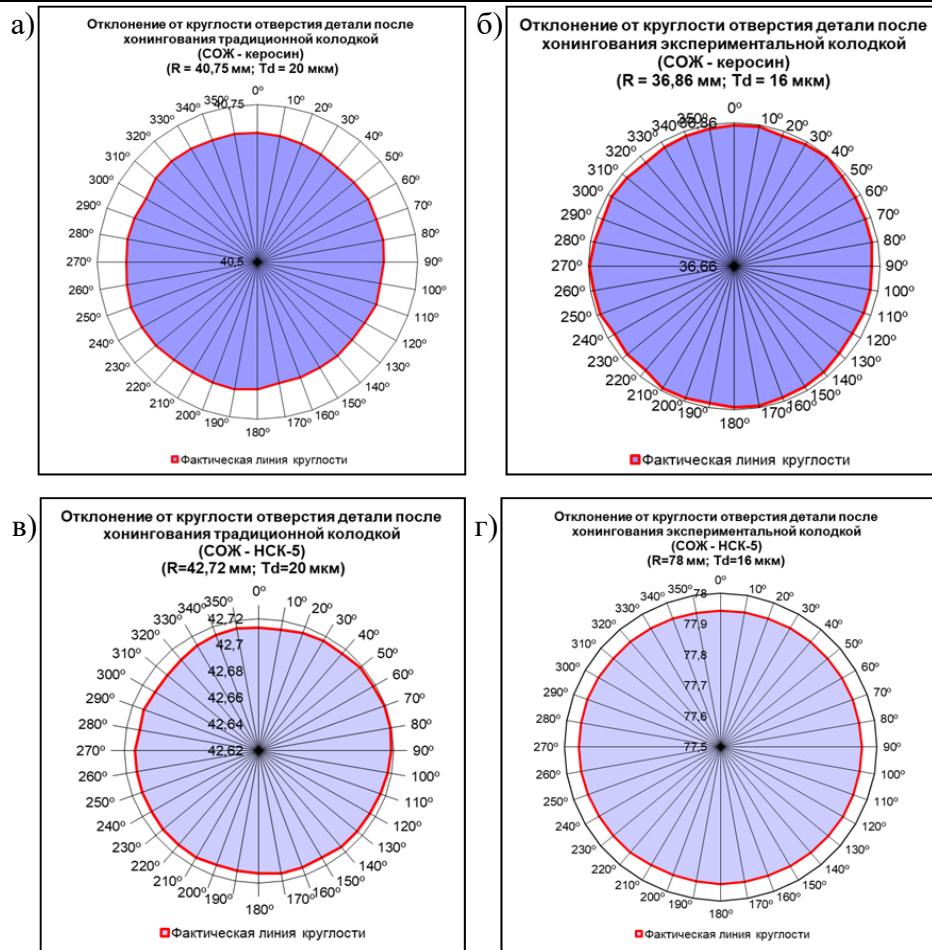


Рис. 5. Отклонение от круглости конического отверстия после хонингования алмазным бруском AC6 500/400-M5-01-100% с использованием: а – традиционной колодки (СОЖ – керосин); б – экспериментальной колодки (СОЖ – керосин); в – традиционной колодки (СОЖ – НСК-5); г – экспериментальной колодки (СОЖ – НСК-5)

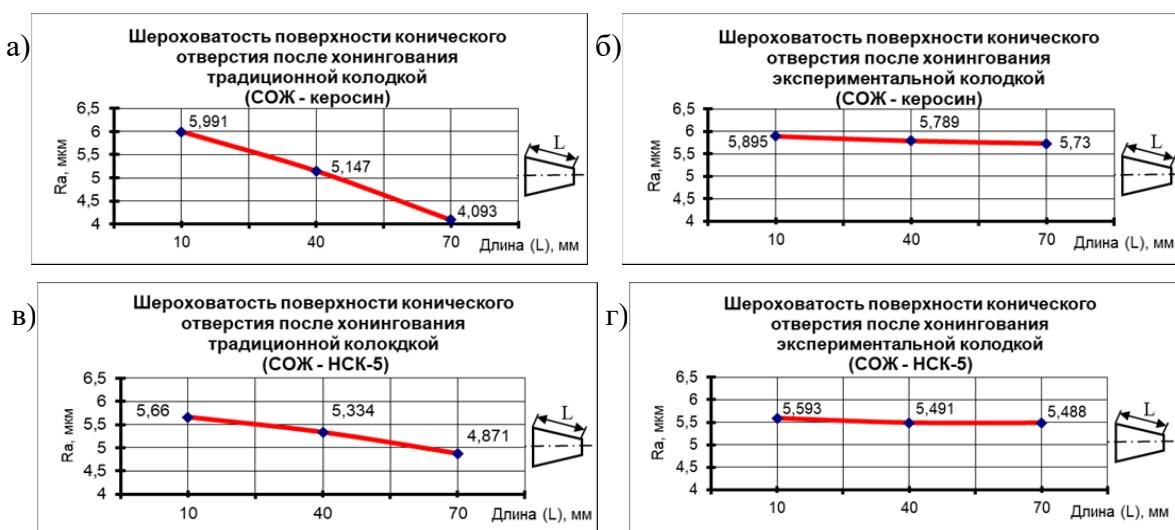


Рис. 6. Шероховатость поверхности образующей конического отверстия после хонингования брусками AC20 125/100-M5-01-100% с использованием: а – традиционной колодки (СОЖ – керосин); б – экспериментальной колодки (СОЖ – керосин); в – традиционной колодки (СОЖ – НСК-5); г – экспериментальной колодки (СОЖ – НСК-5)

**Заключение.** Результаты проведённых экспериментов, характеризующие качество поверхности при хонинговании конических отверстий в стали 40Х алмазными брусками с характеристикой АС6 500/400-М5-01-100%, показали, что обработка с предлагаемой конструкцией колодки для угла конуса 25° в среде НСК-5 позволила повысить точность, выровнять и снизить микронеровность на длине образующей. В дальнейшем планируется проведение экспериментов с подбором СОЖ для обработки труднообрабатываемых материалов, качество которых затруднено из-за засаливания брусков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Джемилов, Э. Ш. Повышение качества обработки конических отверстий алмазным хонингованием на основе исследования контактного взаимодействия инструмента с деталью: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Джемилов Эшреб Шефикович. – Харьков, 2010. – 161 с.
2. Шашин, А. Д. Исследование влияния СОЖ на процесс взаимодействия инструмента и заготовки при обработке металлов резанием: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Шашин Андрей Дмитриевич. – Москва, 2003. – 118 с.
3. Душко, О. В. Обеспечение эффективности алмазно-абразивной обработки изделий из высокотвёрдой керамики: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Душко Олег Викторович. – Волгоград, 2018. – 253 с.
4. Yang, Zhong & Zhen, Yangshu & Tao, Yu. Study on the characteristics of grinding fluid in extrusion grinding machining / Journal of Physics: Conference Series. 2021. – 012054.
5. O. N. Didmanidze, M. Y. Karelina and E. P. Parlyuk. Tribological Characteristics of Promising Cutting Fluids for Metal Cutting / 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2021. Р. 1-4.
6. Башкирцева, И. В. Совершенствование финишной абразивной обработки путём рационального подбора состава смазочно-охлаждающей жидкости / И. В. Башкирцева, Т. Н. Орлова // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2019: сборник статей XVII Международной научно-технической конференции / под общ. ред. В. М. Шумячера. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2019. – С. 124-128.
7. Хонингование: моногр. / А. П. Бабичев [и др.]; под ред. А. П. Бабичева; М-во образования и науки Рос. Федерации; Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т; Донской гос. техн. ун-т. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2013. – 245 с.
8. Косарев, В. В. Профессиональные болезни: учеб. пособие / В. В. Косарев, С. А. Бабанов. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2011. – 207 с.
9. M. Naveed, A. Arslan, H. M. A. Javed, T. Manzoor, M. M. Quazi, T. Imran, Z. M. Zulfattah, M. Khurram, I. M. R. Fattah. State-of-the-Art and Future Perspectives of Environmentally Friendly Machining Using Biodegradable Cutting Fluids / Energies. 2021. – 4816.
10. Jing Ni, Yongfeng Yang, Can Wu. Assessment of water-based fluids with additives in grinding disc cutting process / Journal of Cleaner Production. – P. 593-601.
11. Sharan V., Rajesh H., Sankaranarayanan R. Biodegradable cutting fluids for manufacturing processes // AIP Conference Proceedings. 2020. 140039.

# НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНEDЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА EARTH SCIENCES AND LIFE SAFETY

**Коротеева Л. И., Медведев К. А.**  
**L. I. Koroteyeva, K. A. Medvedev**

## **ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ МНОГОКОНТУРНЫХ ЗЕМЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ**

### **PECULIARITIES OF THE FORMATION OF MULTI-CONTOUR LAND PLOTS**

**Коротеева Любовь Ивановна** – кандидат технических наук, доцент кафедры кадастра и техносферной безопасности Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, г. Комсомольск-на Амуре, ул. Ленина, 27; тел. 8(914)187-87-14. E-mail: Lkoroteewa@yandex.ru.

**Lubov I. Koroteyeva** – PhD in Engineering, Senior Lecturer, Cadastre and Technosphere Safety Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Komsomolsk-on-Amur, Lenin ave., 27; tel. 8(914)187-87-14. E-mail: Lkoroteewa@yandex.ru.

**Медведев Константин Александрович** – магистрант кафедры кадастра и техносферной безопасности Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: kostya\_medvedev\_1999@mail.ru.

**Konstantin A. Medvedev** – Master's Degree Student, Cadastre and Technosphere Safety Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsky Krai, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave 27. E-mail: kostya\_medvedev\_1999@mail.ru.

**Аннотация.** В данной статье проанализированы способы и особенности образования многоконтурных земель. В качестве примера приведён такой объект, как линия электропередач. При установлении границ многоконтурных ареалов есть определённые особенности в требованиях по установлению таких границ, которые рассматриваются в данной работе как в отношении всего многоконтурного землевладения, так и его частей. Даётся разъяснение, почему объединение обычных земельных участков со смежными границами не может быть многоконтурным. Приводятся основные положения в части правил образования многоконтурных земель и их учёта. На конкретном примере рассмотрена подготовка основного документа, на основании которого можно начать процедуру передачи земельного участка в многоконтурном землевладении физическому или юридическому лицу.

**Summary.** This article analyzes the ways and peculiarities of the formation of multi-contour land. As an example, such an object as a power line is given. When establishing the boundaries of multi-contour areas, there are certain peculiarities in the requirements for establishing such boundaries, which are considered in this paper both for the entire multi-contour landholding and for its parts. An explanation is given as to why the consolidation of ordinary land parcels with contiguous boundaries cannot be multi-contour. The basic provisions in terms of the rules of formation of multi-contour land and their accounting are given. By the concrete example, preparation of the main document based on which it is possible to start the procedure of land plot transfer in multi-contour land tenure to physical or legal person is considered.

**Ключевые слова:** многоконтурный земельный участок, граница, учёт, кадастровый квартал.

**Key words:** multi-contour land plot, border, accounting, cadastral quarter.

УДК 332.33

Определение обычного земельного участка (ЗУ) приведено в законодательных документах, основным из которых является «Конституция земли» – Земельный кодекс РФ. В том случае, когда несколько отдельных ЗУ представляют единый земельный комплекс, имеющий в своём составе как участки со смежными границами, так и участки не смежных контуров, то речь идёт о многоконтурном земельном участке. В качестве примера можно рассмотреть такой объект, как линия электропередач. Под каждой опорой данного линейного объекта в определённых границах сформирован обычный земельный участок. Разобщённость границ данных участков позволяет объединить эти участки в многоконтурный ЗУ.

На рис. 1 приводятся методы образования многоконтурных земельных участков.

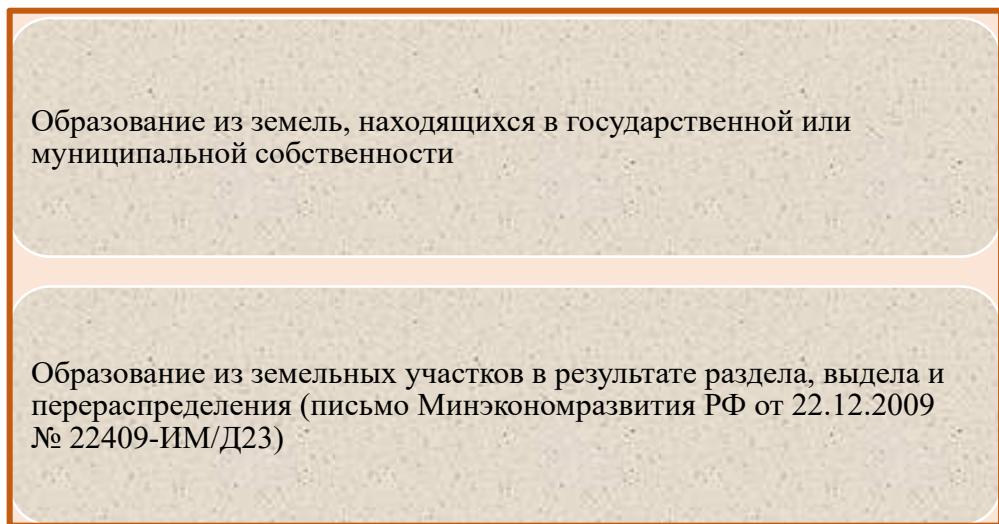


Рис. 1. Методы образования многоконтурных земельных участков

Когда происходит объединение обычных земельных участков со смежными границами, то вновь образованный ЗУ не будет являться многоконтурным, т. к. многоконтурный ЗУ, согласно установленным правилам, не образуется в результате объединения обычных землевладений со смежными границами, такое объединение должно иметь в обязательном порядке участки, отделённые иными землями, например дорогой.

Российским законодательством допускается присвоение многоконтурным ЗУ единого кадастрового номера. Кадастровый инженер при оформлении межевого плана на многоконтурное землевладение присваивает номер определённому контуру в многоконтурном ареале, закреплённый как кадастровый, который идентифицирует всё многоконтурное землевладение, а в скобках арабскими цифрами указывает номера каждого из наделов, образующих данный участок. Например, 29:01:010205:123(1), 29:01:010205:124: ЗУ1(1), ЗУ1(1); число, заключённое в круглые скобки, указывает на номер надела того или иного ЗУ. Характерные точки, определяющие местоположение границы многоконтурного землевладения, имеют сквозную нумерацию (порядок следования такой: от самых незначительных объёмов информации до самых значимых). Если необходимо оформить межевой план на образование новых земельных участков и в процессе данного образования изначальное многоконтурное землевладение было сохранено уже как земельный надел с изменениями, то, составляя межевой план, кадастровые инженеры будут присваивать ареалам границ изменённой многоконтурной земли новые обозначения с учётом порядкового номера контура границы. В отдельных случаях требуется образование части многоконтурного ЗУ (см. рис. 2).

В процессе образования многоконтурных ЗУ должны в обязательном порядке соблюдаться определённые законодательством правила (см. рис. 3).

Так как сам процесс образования многоконтурных ЗУ имеет определённые особенности, следовательно, и учёт таких ЗУ также имеет ряд особенностей:

– Учёт таких землевладений как многоконтурного ЗУ необходимо производить в том кадастровом квартале, в котором он полностью располагается, с присвоением многоконтурному землевладению единого номерного идентификатора.

– Для того чтобы выделить каждый контур многоконтурного землевладения при постановке участка на кадастровый учёт, его наделяют своим номером учёта. Он составлен из двух частей: самого кадастрового номера землевладения и номера контура в многоконтурном землевладении, который обозначен в круглых скобках.



Часть многоконтурного участка может быть образована в пределах:



одного контура границы (такая часть может полностью совпадать с контуром либо может быть образована из части контура);



нескольких контуров (такая часть может полностью совпадать с несколькими контурами либо может быть образована из частей контуров).

Рис. 2. Образование частей многоконтурных земельных участков

Для того чтобы начать процедуру передачи земельного участка в многоконтурном землевладении физическому или юридическому лицу, необходимо подготовить постановление, в котором говорится о предварительном согласовании с предоставлением в собственность земельного участка и утверждением схемы его расположения.

Участок не должен пересекать границы городов или других населённых пунктов.

Виды использования, сервитуты и т. п. не должны мешать пользованию домов и строений, расположенных на участках.

Ограничения, наложенные на участки, не должны мешать их использованию.

Расположение и форма участка не должны препятствовать размещению зданий, если видом использования это допускается.

Рис. 3. Правила образования многоконтурных земельных участков

В разработанном и принятом постановлении должны быть указаны документы, на основании которых оформляется постановление. Так, например, вопрос о предоставлении гражданину земельного участка под жилую застройку индивидуального характера, который имеет условный кадастровый № 27:07:0050102: ЗУ1 в с. Пивань Комсомольского муниципального района в Хабаровском крае администрацией района был решён на основании документов, представленных на рис. 4.



Статья 11.10, подпункт 6 пункта 2 статьи 39.3, статья 39.15  
Земельного кодекса Российской Федерации

Приказ Минэкономразвития России от 01 сентября 2014 г.  
№ 540 «Об утверждении классификатора видов разрешённого  
использования земельных участков»

Заявление от физического лица

Рис. 4. Основания для согласования предоставления в собственность земельного участка

В результате на основании приведённых документов было решено предварительно согласовать передачу в собственность данного ЗУ с утверждением «Схемы расположения многоконтурного земельного участка», имеющего на тот момент условный номер в кадастровом квартале 27:07:0050102. Площадь квартала 2165 м<sup>2</sup>, в квартал входят два контура, которые относятся по категории к землям населённых пунктов, в территориальной зоне Ж-1 с видом разрешённого использования под индивидуальное жилищное строительство. В составе квартала находится 1519 земельных участков, 718 из которых имеют границы.

**Вывод.** С появлением понятия «многоконтурный земельный участок» в такой предметной области, как землепользование, возможно решение ряда определённых проблем, возникающих при кадастровом учёте. Упрощается процедура по разделу многоконтурных землевладений, включая оформление, т. к. они, так же как и обычные ЗУ, являются объектами купли-продажи, договоров дарения и ренты.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Земельный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 25 октября 2001 г. № 136-ФЗ (ред. от 10.01.2021) // Справочно-правовая система «КонсультантПлюс». – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_33773/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_33773/) (дата обращения: 24.10.2022). – Режим доступа: по подписке. – Текст: электронный.
2. Градостроительный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ (ред. от 30.12.2021) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2022) // Справочно-правовая система «КонсультантПлюс». – URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_51040/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/) (дата обращения: 24.10.2022). – Режим доступа: по подписке. – Текст: электронный.
3. Правила землепользования и застройки // Комсомольск-на-Амуре. Официальный сайт органов местного самоуправления. – Раздел сайта «Деятельность», подраздел «Управление городом». – URL: <https://www.kmcity.ru/activity/city/land-use/rules/docs> (дата обращения: 06.06.2022). – Текст: электронный.
4. Галкина, Е. Г. Анализ успешного опыта организации современных жилых кварталов в России / Е. Г. Галкина, К. С. Зубкова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V-1 (53). – С. 96-102.
5. Гринкруг, Н. В. Современные тенденции в панельном домостроении / Н. В. Гринкруг, Т. М. Михайлова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2021. – № V-1 (53). – С. 110-115.
6. Демидова, П. М. Развитие кадастровой деятельности в России на современном этапе / П. М. Демидова // Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Наука и образование: сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции / Науч. ред. О. А. Лазебник. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2019. – С. 528-530.

7. Димитриади, Е. М. Комплексный подход к формированию колористики городской среды / Е. М. Димитриади // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2020. – № I-2 (41). – С. 9-13.
8. Димитриади, Е. М. Анализ архитектурно-колористической образности городов Дальнего Востока / Е. М. Димитриади // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2021. – № II-2 (50). – С. 4-10.
9. Лазарева, О. С. Земельная политика как фактор экономического роста региона / О. С. Лазарева, О. Е. Лазарев // Теоретические, экспериментальные и прикладные исследования молодых учёных Тверского государственного технического университета: сборник научных трудов. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2017. – С. 264-268.
10. Мезенина, О. Б. Управление земельными ресурсами России на современном этапе / О. Б. Мезенина, А. В. Лантанова, А. А. Рассказова. – Екатеринбург: УГЛТУ, 2012. – 63 с.
11. 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.
12. 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.
13. khabkrai.ru: официальный сайт Хабаровского края и Правительства Хабаровского края. – Хабаровский край. 2022 –. – URL: <https://www.khabkrai.ru> (дата обращения: 28.04.2022). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
14. easymoneyinfo.ru: официальный сайт Инвестиции в земельные участки. – Легкие деньги. 2022 –. – URL: <https://easymoneyinfo.ru/vse-ob-investitsiyah-v-zemelnye-uchastki/> (дата обращения: 22.04.2022). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
15. Информационный портал Управления Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии РФ. – URL: <https://rosreestr.ru/site/> (дата обращения: 22.04.2022). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.
16. Свитин, В. А. Теоретические основы кадастра: учеб. пособие / В. А. Свитин. – Минск: Новое знание; Москва: ИНФРА-М, 2020. – 256 с.
17. Шмидт, И. В. Ведение государственного кадастра недвижимости на региональном уровне: учебно-методическое пособие / И. В. Шмидт. – Саратов: Корпорация «Диполь», 2014. – 206 с.

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

**Маначенко В. А., Галкина Е. Г.**  
**V. A. Manachenko, E. G. Galkina**

**СИНТЕЗ НАУК В ДИЗАЙНЕ КАК МЕТОД КОМПЛЕКСНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
(BIM-ТЕХНОЛОГИИ)**

**SYNTHESIS OF SCIENCES IN DESIGN AS A METHOD OF INTEGRATED DESIGN (BIM TECHNOLOGIES)**

**Маначенко Василина Андреевна** – студент 4-го курса Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(914)422-76-81. E-mail: vmanachenko16@mail.ru.

**Vasilina A. Manachenko** – 4th year Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(914)422-76-81. E-mail: vmanachenko16@mail.ru.

**Галкина Елена Георгиевна** – кандидат культурологии, доцент кафедры «Дизайн архитектурной среды» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); тел. 8(924)227-87-40. E-mail: arhigeg@mail.ru.

**Elena G. Galkina** – PhD in Cultural Studies, Associate Professor, Architectural Environment Design Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(924)227-87-40. E-mail: arhigeg@mail.ru.

**Аннотация.** В статье анализируется важность синтеза наук, объясняются разные методы проектирования, приводятся аргументы важности грамотного проектирования и планирования пространства. Также даются обозначения термина синтез наук в искусстве, дизайне и проектировании. Кроме того, рассматриваются становящиеся доступными в мире BIM-технологии информационного моделирования, объясняется построение, управление и реализация BIM-моделей в жизнь.

**Summary.** The article analyzes the importance of the synthesis of sciences, explains different design methods, and provides arguments for the importance of competent design and space planning. The notation of terms is also given: the synthesis of sciences in art, design and engineering. In addition, the BIM information modeling technology becoming available in the world is considered, the construction, management and implementation of BIM models in life is explained.

**Ключевые слова:** дизайн, синтез наук, искусство, метод комплексного проектирования, строительство, архитектура, BIM-технологии, информационные модели, BIM-модель.

**Key words:** design, synthesis of sciences, art, integrated design method, construction, architecture, BIM technologies, information models, BIM model.

УДК 7.01:7.021.2

Одной из необходимых созидаательных деятельности науки является синтез. Синтез – это создание целостно-структурированного произведения или предмета. В наше время в связи с постоянными изменениями в окружающей среде и дизайне в целом чётко проявляются синтез разнообразных дизайнерских направлений и их динамическое взаимодействие. Происходящие конструктивные конфигурации и свежие веяния в дизайне считаются важным нюансом мировоззренческих ориентаций в системе ценностей, эталонов и общепризнанных мерок. Синтез и комплексность проектной культуры, отражающиеся в различных сферах дизайна, проявляются в реальной действительности и в пространственной среде. При более подробном изучении дизайна как дисциплины складывается впечатление, что он всегда находится на грани святого и светского, бедности и богатства и т. д. Понятие «синтез наук» связывает отдельные виды искусств и предполагает создание свежего художественного объекта, при помощи органичного соединения различных видов искусств в единое целое, причём на более высоком уровне взаимодействия. Это синтез веще-

ственной и духовной среды бытия человека. Это явление обобщает идеино-мировоззренческое и композиционное согласие в организации места, оказывая многостороннее художественно-эмоциональное влияние на восприятие человека. Включаемое в синтез новое произведение со всеми его элементами, художественными качествами, функциями и чертами должно отыскать своё пространство в целом.

Синтез наук – это комплекс различных сфер изучения, где при условии удаления одной из дисциплин синтез не может существовать. При изучении дизайна студент также рассматривает и многие другие предметы: экономику, математику, инженерные системы, конструкции зданий, историю искусств и архитектуры, ландшафт и т. д. При неполном изучении одной из наук происходит разрушение синтеза, что впоследствии влечёт проблемы в трудовой деятельности и некомпетентность специалиста (архитектора или дизайнера). Причём любой из составляющих и взаимодополняющих дисциплинарных предметов, являясь одним из компонентов в совместной структуре, не имеет возможности быть исключённым из целостной системы обучения без разрушения всего целого.

Разный труд и творчество человека реализуются во всевозможных масштабах как в закрытых пространствах внутреннего убранства жилых и социальных помещений, так и в экsterьерах городской среды. В зодчестве подробнее открывается художественный тип произведения в итоге взаимосвязанной органической целостности всевозможных обликов изобразительного и декоративно-прикладного искусства, таких как графика, монументальная живопись, скульптура (см. рис. 1). Таким образом формируется целый комплекс в архитектурной среде в свежей эстетической и художественно-эмоциональной форме.

а)



б)



Рис. 1. Изобразительное и декоративно-прикладное искусство:

а – статуя бога реки Тибр; б – монументальная декоративная живопись на Доме молодёжи  
в г. Комсомольске-на-Амуре

Мощным инструментом в пространственной композиции считается колористическое решение. Цвет позволяет определить, распознать место объекта, колор применяется как аспект контраста [4]. При поддержке цвета можно достичь взаимодействия всевозможных форм и предметов в экsterьере (см. рис. 2). Поэтому если убрать из синтеза предметов колористику, рухнет концептуальный метод обучения архитектора.

Дизайн является не просто красивой картинкой. Вступая в ряды творческих людей, студент должен изучать дисциплины, на первый взгляд совсем не связанные, например, с дизайном интерьеров. Без изучения физики, конструкции и инженерных систем невозможно воссоздать дом, взятый с картинки, невозможно использовать произвольные размеры стен или плит перекрытий зданий. Необходимо помнить, что если убрать одну из дисциплин в обучении студента, велика вероятность получить непрофессионального работника.



Рис. 2. Пример цветового акцента на здании

ненным, со смысловой нагрузкой и полезным для общества.

Неразрывная ассоциация графического дизайна с дизайном среды подтверждается потребностью научно-обоснованного заключения задач в организации гармонической объёмно-пространственной структуры и невозможностью разделения друг от друга этих двух направлений.

Существует множество методов и процессов проектирования. Для того чтобы выбрать определённый метод, необходимо поставить задачу и цель. Однако при более глубоком анализе методов существенным является не столько проектирование в общепринятом смысле этого слова, сколько мыслительная деятельность проектировщика. Каждый метод и его выбор основываются на выражении концепции и принципов. К тому же благодаря методам проектирования выбранная концепция формируется в материальный объект. Они влияют друг на друга. Методы вместе образуют цельную проекцию проектируемого объекта. Неиспользование одного из методов проектирования создаёт неверный проект. Их связь организует собранность проектируемого объекта. Проект становится более наполненным, со смысловой нагрузкой и полезным для общества.

Рассмотрим несколько методов комплексного проектирования.

*Метод аналогии* решает задачи, поставленные перед человеком во время создания проекта. При обдумывании концепции используются аналоги, взятые из жизни: природа, культура, техника, инженерные решения. Дизайнер трансформирует готовый продукт, применяет интерпретацию и творчество – и на выходе получается новое проектное решение. Данный метод часто применяют на стадии образного решения объекта в проектировании [2]. Первоначально у предмета было одно предназначение, после переработки информации, преобразования форм и усовершенствования на выходе получается совсем другой предмет с противоположными функциями. К примеру, дизайнер одежды, вдохновившийся цветком, создаёт платье похожей формы, используя бионику (см. рис. 3). Данный метод часто используется на этапе определения внешнего вида создаваемого предмета.



Рис. 3. Пример метода аналогии в дизайне одежды

*Метод ассоциаций* – это единственный из методов развития идеи. Данный метод можно использовать только в тех случаях, если у дизайнера хорошо развито творческое воображение, если он обращается к большому количеству концепций окружающей деятельности. В наше время в дизайне чем ярче образное мышление и фантазия автора, тем идеи будут современней, а значит, образуется новый способ проектирования [2].

*Бионический метод* – это метод проектирования, основанный на изучении, анализе реальных объектов живой природы и воплощении их форм в жизнь. К примеру, свечение некоторых насекомых вдохновило дизайнеров изготовить обувь со светящимися элементами в подошве. Также используются формы сот в благоустройстве территории, в проектировании малых архитектурных форм и зданий. Бионический подход позволяет получить неординарное решение задачи, применить природные фактуры в архитектуре и не только, а также использовать новые свойства в поверхности строительных материалов (см. рис. 4).

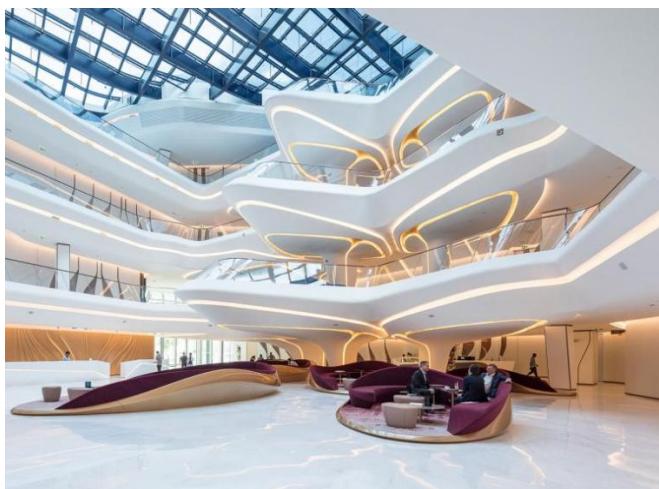


Рис. 4. Пример бионического метода в проектировании

*Модульный метод* в проектировании – это подход, выполняющийся с помощью деления готового изделия на похожие друг на друга блоки (модули) с целью выполнения каждым блоком отдельных задач (см. рис. 5). Этот метод часто применяют в создании интерьеров, детских площадок и малых архитектурных форм. Данный метод делят на три группы:

1. гнездовая;
2. шинная;
3. секционная.

В модульно-гнездовой архитектуре все связи между блоками разные и поэтому не взаимодействуют друг с другом. В шинно-модульной архитектуре все блоки соединяются с помощью однотипных связей, т. к. при проектировании предполагается общая шина. В секционно-модульной архитектуре конструкция собирается путём присоединения блоков друг к другу. Использование модульной архитектуры позволяет:

- создавать высокий перечень продукции, базовых блоков, которые могут применяться в различных сферах;
- унифицировать производственные процессы;
- сократить количество переработки материалов;
- сократить издержки производства за счёт уменьшения объёма;
- ускорить расчёт стоимости продукции;
- сократить сроки производства продукта и выпуска нового;
- упростить обслуживание.

*Комбинаторный метод* – это способ формообразования в дизайне, образованный на исследованиях, способах проектирования объектов дизайна, вариантом проектировании в графике, конструкциях и функциональных структурах [1]. Основные приёмы комбинаторики:

- комбинирование компонентов в плоскости при использовании текстильных композиций;
- комбинирование деталей, деление внутри определённой формы;
- комбинирование типовых элементов при создании готовой формы.



Рис. 5. Пример применения модульного метода в архитектуре сооружений. В BIM-технологии здание и всё, что к нему относится, рассматривается как единый объект. Новые технологии предоставляют возможность сделать огромный шаг в разработке любого средового пространства и строительного объекта при его реализации в жизнь. Использование BIM-технологии повысит качество проектирования, улучшит способы реализации и коммуникации, что даст возможность перейти на новый уровень всем отраслям, работающим над созданием проекта.

*Метод передовых технологий* используется при создании объектов, способных изменять внешний вид (см. рис. 6).

*Эвристическое комбинирование* – метод *перестановки*, представляющий замену элементов в проекте. Данный метод часто применяется в практике, он прост в использовании и даёт неожиданные результаты в проектировании.

Комплексное проектирование как *информационный метод*. Данный процесс является системой, т. к. при создании проекта специалисты разных направлений обмениваются информацией и идеями. Через информационный метод комплексное проектирование улучшает работу, у участников возникает взаимопонимание, что делает информацию легкоусваиваемой и доступной для восприятия.

В мире становится популярной технология информационного моделирования, или BIM-технология – способ оснащения и обеспечения здания, предусматривающий комплексную работу в процессе проектирования объекта всей архитектурной, экономической и инженерной информации о



Рис. 6. Пример применения метода передовых технологий (ночное освещение)

BIM-технология – это информационная модель (см. рис. 7). Сама модель плотно взаимодействует с базой данных, в которой каждому элементу можно присвоить индивидуальные атрибуты. В чём же плюс такой связи? При изменении любого параметра компонента одного большого организма (проектируемого здания или среды) автоматически изменяются и связанные с ним объекты (чертежи, визуализации, спецификации и рабочие документы).

При создании BIM-модели необходимо учитывать, что модель в итоге хорошо скоординирована и взаимосвязана, также она имеет геометрические привязки и пригодна для расчётов и анализов (см. рис. 8). В основе технологии лежит объектно-ориентированное проектирование, это значит, что вся работа производится с учётом заранее созданных объектов, называемых «семействами», а основные операции ведутся с неделимыми блоками.

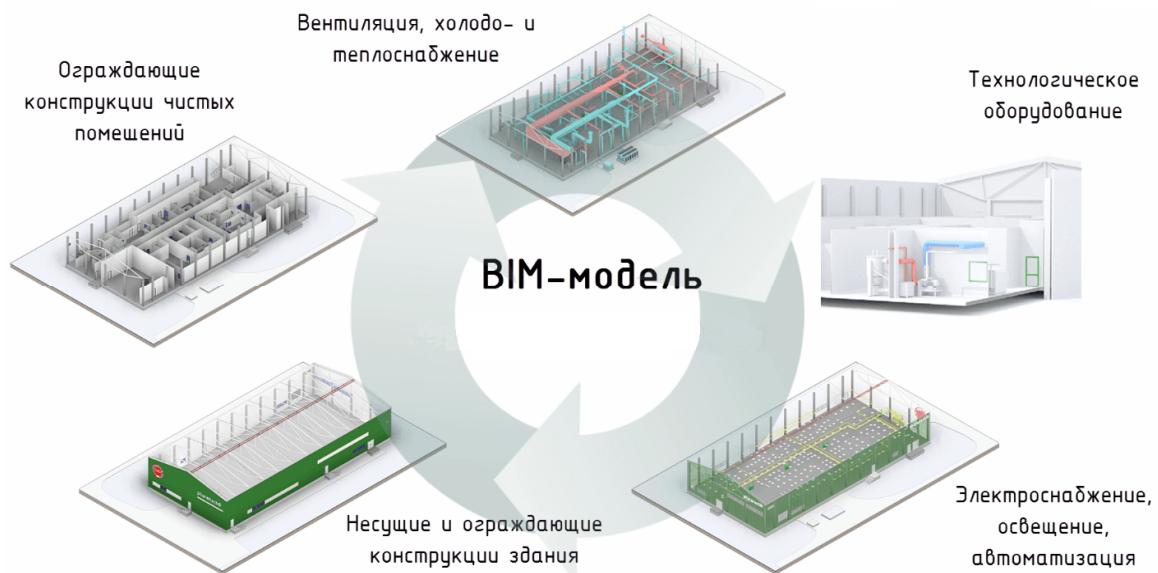


Рис. 7. Схема состава чертежей, вошедших в BIM-модель

Каждый элемент модели несёт в себе геометрическую и атрибутивную информацию. BIM-модель предполагает коллективную работу, тем самым объединяя специалистов разных профессий для реализации проекта: архитекторов, технологов, конструкторов, инженеров внутренних и наружных сетей, дизайнеров и др. Комплексная работа всех специалистов происходит в единой среде проектирования СОД (среда общих данных), в которой должны быть общие правила для всех участников и полное взаимодействие участников процесса BIM-моделирования, которые отражаются в ВЕР-документе.

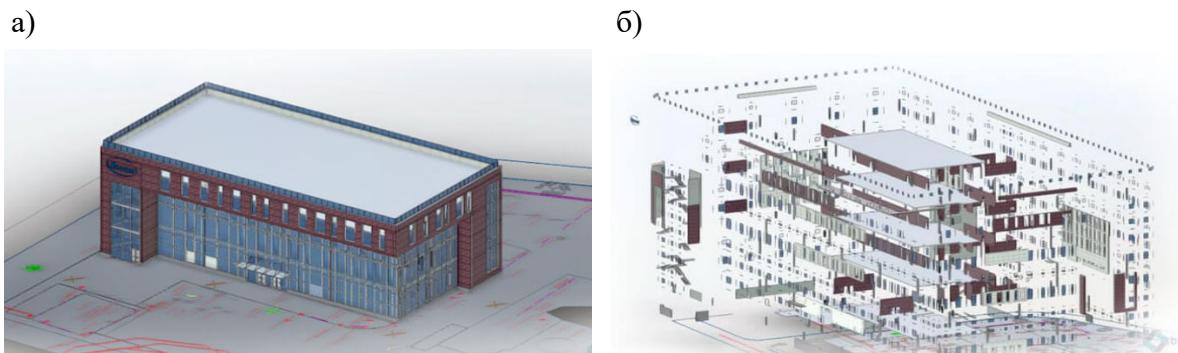


Рис. 8. Сооружение, созданное с помощью BIM-модели:  
а – BIM-модель; б – здание, состоящее из отдельных геометрических форм

Процесс создания BIM-модели:

1. запрос на создание от заказчика;
2. формирование технического задания, EIR;
3. формирование исполнителем ВЕР-плана реализации проекта;
4. предпроект, компоновка оборудования;
5. конструкторские работы;
6. проектные работы;
7. утверждение, согласование;
8. разработка рабочей документации;
9. передача модели в строительство;

## 10. архивирование.

Создание и формирование модели происходит в среде общих данных, следовательно, все участники владеют обязательным доступом к модели, наполненной информацией: инженерной, финансовой и т. д. Группа лиц, имеющих доступ к BIM-документам и моделям:

1. инвестор;
2. владелец объекта;
3. эксплуатирующая служба;
4. субподрядчик;
5. генеральный подрядчик;
6. завод-изготовитель;
7. главный проектировщик.

Управление уровнями доступа всех, кто участвует в создании проекта, обеспечивает чёткость, сплочённость и актуальность полученного результата для каждой из задач. Таким образом, BIM-технология рассматривает все без исключения стадии жизненного цикла здания, постоянно наполняя его информацией, что в итоге снижает стоимость материалов, содержания, сокращает скорость постройки и уменьшает проектные ошибки. Участникам, создающим проект, необходимо его выполнять несмотря на бюджет, ограничения по рабочей силе, ускоренный график [5].

Есть четыре основных проектных направления: архитектура, строительство, электротехническое и сантехническое проектирование. Все направления должны быть хорошо скоординированы, т. к. при дальнейшей эксплуатации сооружения не могут противоречить друг другу. Как раз информационное моделирование зданий и сооружений помогает обнаружить недочёты и ошибки в определённом месте с помощью базы данных. Концепция BIM-технологии начинается с построения здания в информационном поле, и только после компьютерной проработки оно возводится в реальности. Это делается для того, чтобы уменьшить риск обрушения и уменьшить неопределенность. Субподрядчики на каждом этапе работы могут вводить изменения в модель, что поможет снизить затраты и составить более точный бюджет. Объёмы работ определяются на этапе проектирования [5]. BIM-технология устраниет ошибки, выделяя в модели определённые места, где части здания неправильно соединяются или материалы применены неверно и т. д. Ещё одним плюсом является то, что при использовании BIM-модели материалы всегда будут точно подобраны, изготовлены в срок и привезены на участок в назначенный срок (см. рис. 9).



Рис. 9. BIM-модель здания

Внедрение BIM-технологий в производство необходимо, т. к. это откроет больше возможностей в создании глобальных проектов, повысит качество проектов на стадии эксплуатации и строительства. Для этого понадобится много времени, не весь бизнес готов к таким сложностям, необходимо много физических и финансовых ресурсов. Ещё одной немаловажной деталью является процесс обучения сотрудников, которых необходимо подготавливать не только на курсах дополнительного образования, но и в высших учебных заведениях [3].

Представление технологии проектирования даст возможность исключить ненужные операции, уменьшить время работы, повысить качество и придать разработанному проекту презентабельный вид.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вартанова, Л. К. Оригами как метод творческого выражения / Л. К. Вартанова // Методологический и технологический ресурс развития информационно-образовательной среды. – Москва: Ваш формат, 2018. – С. 389-395.
2. Грашин, А. А. Методология дизайн-проектирования элементов предметной среды: учеб. пособие / А. А. Грашин. – М.: Архитектура-С, 2004. – 232 с.
3. Полуэктов, В. В. Информационное моделирование (BIM) для студентов института архитектуры и градостроительства / В. В. Полуэктов, А. Н. Азизова-Полуэктова // Архитектурные исследования. – 2016. – № 3. – С. 47-52.
4. Димитриади, Е. М. Анализ архитектурно-колористической образности городов Дальнего Востока / Е. М. Димитриади // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2021. – № II-2 (50). – С. 4-10.
5. Грахов, В. П. Развитие систем BIM проектирования как элемент конкурентоспособности // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1-1. – С. 580.



Гринкруг Н. В., Ефимова К. С.  
N. V. Grinkrug, K. S. Efimova

## МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ГОРОДСКОГО ПРОСТРАНСТВА ПОСРЕДСТВОМ РАЗВИТИЯ, ОРИЕНТИРОВАННОГО НА ТРАНЗИТНЫЕ СООБЩЕНИЯ

### METHODOLOGY FOR OPTIMIZING URBAN SPACE THROUGH TRANSIT-ORIENTED DEVELOPMENT

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

**Natalya V. Grinkrug** – PhD in Engineering, Associate Professor, Architectural Environment Design Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave., 27. E-mail: das@knastu.ru.

**Ефимова Ксения Сергеевна** – магистр кафедры «Дизайн архитектурной среды» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел. 8(924)312-66-89. E-mail: das@knastu.ru.

**Ksenia S. Efimova** – Master's Degree Student, Architectural Environment Design Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk Territory, Komsomolsk-on-Amur, Lenin Ave., 27; tel. 8(924)312-66-89. E-mail: das@knastu.ru.

**Аннотация.** В данной статье рассматривается методика оптимизации городского пространства с помощью развития транспортных сообщений, а также создания всех условий жизнедеятельности в зонах транспортных узлов, таких как железнодорожные, автобусные, трамвайные остановки. Формирование жилых кварталов вокруг остановок общественного транспорта позволяет организовывать активную экономическую зону для предприятий малого, среднего бизнеса, тем самым подразумевая развитие не только городского пространства, но и его экономики. Методика стратегии «транзит» (TOD) позволяет организовывать работу административных, городских, транспортных и экономических структур города, позволяя выявлять негативные аспекты района на этапе планирования. Компактная жилая, общественная застройка, организованная транспортная сеть позволяют повысить статус района и стоимость жилья, что способствует привлекательности территории для потенциальных покупателей и жителей. В целом, методика стратегии «транзит» уже используется в различных городах Европы и Азии и может быть использована в городах России как способ формирования экономически привлекательных районов.

**Summary.** This article discusses the methodology of optimizing urban space through the development of transport links, as well as creating all the conditions of life in the areas of transport hubs, such as rail, bus, and streetcar stops. The formation of residential areas around public transport stops makes it possible to organize an active economic zone for small and medium-sized businesses, thereby implying the development of not only the urban space, but also its economy. The strategy method «transit» (TOD) allows organizing the work of administrative, urban, transport and economic structures of the city, allowing revealing the negative aspects of the area at the planning stage. Compact residential, community development, and organized transport network can improve the status of the area and the cost of housing, which contributes to the attractiveness of the area for potential buyers and residents. In general, the methodology of the strategy «transit» is already used in various cities in Europe and Asia and can be used in Russian cities as a way to form an economically attractive area.

**Ключевые слова:** дизайн, микрорайон, пешеходная улица, автомобили, пешеходы, дорожное движение, транспорт, качество, маршрут, пассажиры, оптимизация, сеть.

**Key words:** design, neighborhood, pedestrian street, cars, pedestrians, traffic, transport, quality, route, passengers, optimization, road traffic.

**Введение.** На сегодняшний день численность населения, проживающего в городских пунктах, быстро растёт. Стирается граница между пригородом и центром города. Городское пространство становится для человека местом, где должны быть организованы не только общественные пространства, жилые кварталы, промышленные и рекреационные зоны, но и их мобильность и доступность. Одним из факторов, влияющих на это, является транспорт, а также транзитные сообщения между микрорайонами [7]. Поэтому приоритетным направлением в формировании удобных транзитных сообщений является оптимизация городского пространства посредством развития транспортной инфраструктуры с помощью стратегии «транзит», или TOD.

Одним из ключевых факторов социально-экономического развития XX в., особенно в развивающихся странах, по праву можно считать урбанизацию [6]. Урбанизация прежде всего это увеличение численности населения, а также большое влияние городов на формирование общества и культуры. Чаще всего урбанизация возникает как ответ на появление в городе или рядом с ним предприятий, экономически развитых территорий с малым и средним бизнесом, т. е. активной экономической зоны [9].

Несмотря на то что города на протяжении всей истории являлись источником ключевых исторических событий, их численность и массивность начала формироваться после промышленной революции. Начиная с 1950-х гг. городское население по всему миру достигло 2,6 млрд человек. С 50-х по 90-е гг. ХХ в. мировое население увеличилось на 4,2 млрд человек. Это приблизительно 55 % всего населения мира. Многие эксперты полагают, что эта тенденция будет сохраняться и в будущем и к 2050 г. доля городского населения может достигнуть 70 и более процентов. Кроме того, городское население также играет большую роль в объемах производства, распределении и потреблении в контексте национальной экономики (см. рис. 1).

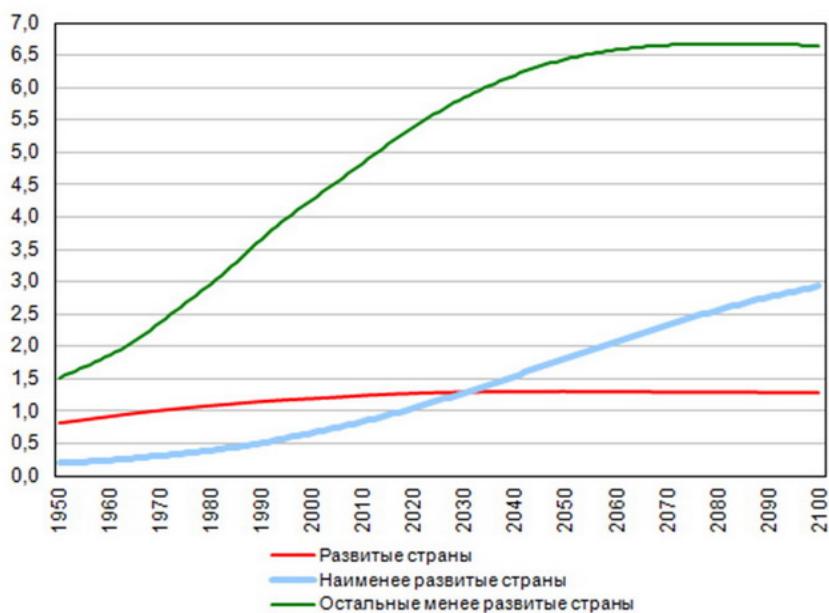


Рис. 1. Городское население мира, 1950 – 2015 гг. с прогнозами до 2050 г.  
(ссылка: <https://iq.hse.ru/news/177669242.html>)

В основе глобальной урбанизации лежат три основных демографических тенденции:

1. Естественный прирост. Фазы демографического перехода обычно связаны с темпами урбанизации, при этом годы пикового роста соответствуют большим различиям между показателями рождаемости и смертности. Хотя естественный прирост играл важную роль в прошлом, сегодня он имеет гораздо меньшее значение, поскольку во многих развитых странах уровень рождаемости

значительно снизился. В некоторых случаях, например в Западной Европе, Японии и Южной Корее, рождаемость ниже коэффициента замещения.

2. Миграция из сёл в города. Это важнейший фактор, определяющий урбанизацию в развивающихся странах, где на миграцию приходилось от 40 до 60 % от роста городов. Миграция началась в начале XX в. сперва в развитых странах, а затем, в середине века, продолжилась уже и в развивающихся странах. Основными факторами, которые определяли миграцию в те годы, стали желание населения трудоустроиться, повысить производительность сельского труда или даже сменить обстановку вследствие экономических, политических или экологических проблем (см. рис. 2).

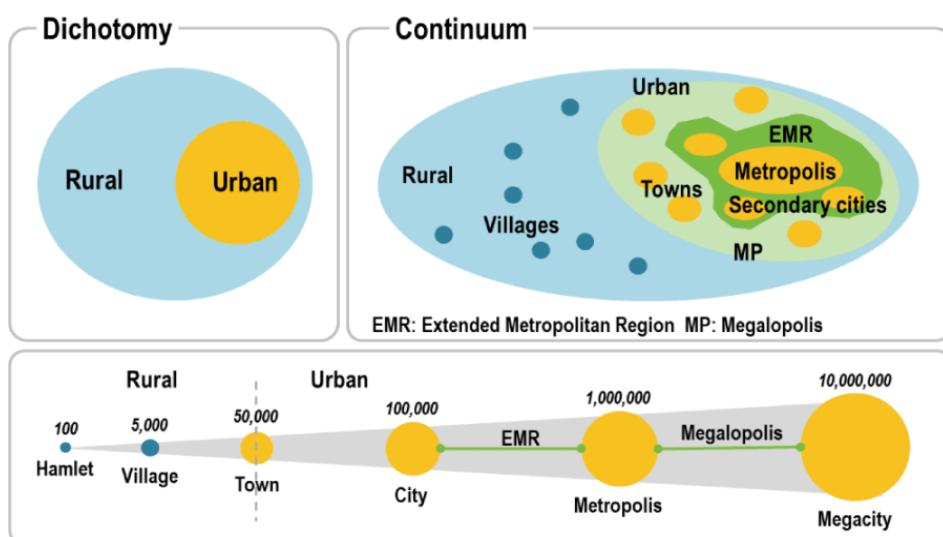


Рис. 2. Перспективы городской пространственной структуры: от дихотомии к континууму

3. Международная миграция. Рост международной миграции стал важным фактором урбанизации крупных «воротных» городов, таких как Лос-Анджелес, Майами, Нью-Йорк, Лондон и Париж. Этот процесс, как правило, происходит в крупнейших городах, но он распространяется и на города меньшего размера [3].

В результате урбанизации проблемы городской мобильности обострились пропорционально, а в некоторых случаях и экспоненциально. Это связано с двумя явлениями. Во-первых, это появление сети мегаполисов, на которые приходится наиболее серьёзная проблема городской мобильности. Во-вторых, потребности в мобильности, как правило, концентрируются в определённых городских районах, таких как центральные деловые районы.

В настоящее время статистика показывает, что ежегодно число городских жителей увеличивается примерно на 50 млн человек. Почти 90 % от этого количества приходится на развивающиеся страны. Это сильно сказывается на городской среде, особенно на транспорте. Также встает вопрос о целесообразном размере городов, т. к. технические возможности позволяют строить большие города без особых препятствий. Многие города не считаются благополучными, т. к. при их росте возникают инфраструктурные сложности, которые не всегда успешно решаются [2].

Развитие, ориентированное на транзит (Transit-Oriented Development – TOD), это стратегия планирования, направленная на концентрацию рабочих мест, жилья и услуг вокруг остановок общественного транспорта, станций метро или железнодорожного транспорта. От Копенгагена до Сингапура этот подход помог сократить свой углеродный след, при этом города стали более производительными и пригодными для жизни. Однако принципы TOD (стратегия «транзит») не могут применяться единообразно во всей городской или транзитной сети. Рекомендуется одновременно рассматривать «три ценности» района (транзитную связь, качество городской среды и рыночный

потенциал), чтобы определить, какие станции (остановки) являются хорошими кандидатами на TOD и какое развитие имеет смысл в каждом районе.

Стратегия «транзит» основывается на эффективной работе городских инфраструктур (городское экономическое планирование, служба городского транспорта, землепользование и кадастры), где данные службы основываются на определённых данных, которые собираются в процессе функционирования города. Такая система работы городских служб успешно применяется в городах по всему миру, в том числе Стокгольм, Копенгаген, Гонконг, Токио и Сингапур.

Способствуя повышению плотности населения и концентрации рабочих мест в относительно небольших районах, стратегия «транзит» создаёт агломерационные эффекты, которые повышают конкурентоспособность города. Исследования показали, что удвоение плотности рабочих мест повышает экономическую производительность города на 5-10 %.

Такая концентрация создаёт динамичные сообщества с высококачественными общественными зонами и более короткими расстояниями до городов, что делает их более пригодными для жизни.

Компактная городская застройка и высококачественный общественный транспорт также взаимно усиливают друг друга: общественный транспорт может поддерживать большие пассажиропотоки, которые возникают при высокой плотности застройки, в то время как концентрация рабочих мест и жилья вокруг станций помогает сделать общественный транспорт финансово жизнеспособным (см. рис. 3).



Рис. 3. Схематичное изображение идеи «Transit-Oriented Development»

Близость к остановкам общественного транспорта улучшает доступ к районам стратегии «транзит», повышая их привлекательность и увеличивая стоимость недвижимости.

В то время как стратегия «транзит» может повысить цены на недвижимость и ускорить благоустройство территории, это можно компенсировать, выделив значительную часть нового строительства на доступное жильё.

Концентрируя рабочие места, услуги и жильё в зоне обслуживания транзитных станций, стратегия «транзит» делает общественный транспорт более привлекательным и эффективным вариантом, одновременно снижая зависимость от частных автомобилей и способствуя более коротким поездкам на работу (см. рис. 4). В результате стратегия «транзит» обычно приводит к повышению производительности и уменьшению выбросов углекислого газа.

При размещении в районах, менее подверженных стихийным бедствиям, подход TOD может повысить устойчивость к рискам бедствий за счёт поддержки жилья с высокой плотностью застройки и деятельности в зонах с более низким уровнем риска.

## TRANSIT ORIENTED DEVELOPMENT (TOD)

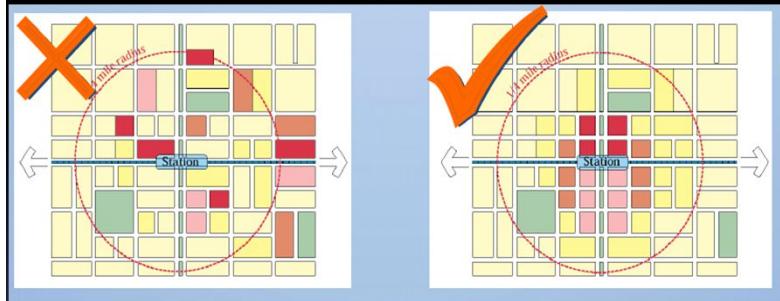


Рис. 4. Концепция стратегии «транзит»

Принципы стратегии «транзит» не могут применяться единообразно во всём городе или транспортной сети, поскольку плотность рабочих мест и людей сильно различается в пределах городского пространства. Заграничный опыт показывает, что только около 15 % транзитных станций и прилегающих к ним территорий могут поддерживать очень высокую плотность застройки.

Чтобы принимать обоснованные решения о стратегии «транзит», исследовательские институты и правительства разработали различные методологии, которые могут помочь определить, какие районы являются хорошими кандидатами для стратегии «транзит», какой уровень плотности может поглотить территория вокруг данной остановки или станции, и выяснить, какой тип развития имеет смысл в конкретной области, стремясь найти правильный баланс между рабочими местами, жильём и другими удобствами.

**Заключение.** На основе этих подходов предлагается новая система для руководства планированием стратегии «транзит» путём одновременной оценки «трёх значений» транзитных станций и прилегающих районов:

1. значение узла (района) описывает важность остановки или станции в сети общественного транспорта на основе пассажиропотока, связей с другими видами транспорта и центральной роли в сети;

2. стоимость места отражает качество и привлекательность территории вокруг станции. Факторы включают разнообразие землепользования; наличие основных услуг, таких как школы и здравоохранение; доля повседневных удобств, к которым можно добраться пешком или на велосипеде; доступность для пешеходов, а также размер городских кварталов вокруг станции;

3. рыночная потенциальная стоимость относится к нереализованной рыночной стоимости площадей станций. Она измеряется путём анализа основных переменных, которые могут повлиять на спрос земли (текущее и будущее количество рабочих мест в непосредственной близости от станций, количество рабочих мест, доступных транзитом в течение 30 минут, текущая и будущая плотность жилья), а также предложение (количество пригодных для застройки земель, возможные изменения в политике зонирования, динамика рынка и т. д.).

В целом, стратегия «транзит» может успешно использоваться в городах России, тем самым повышая комфортность и привлекательность уже существующих районов, которые основаны вокруг территорий транспортных остановок [8].

Таким образом, представленная методика оптимизации городского пространства с помощью транзитных сообщений, а также выявление и устранение негативных аспектов между взаимодействием транспортного узла, общественных мест и рыночных потенциальных возможностей создают новые экономические средства развития города. Это происходит путём улучшения городской среды вокруг крупного транзитного узла или улучшения обслуживания общественного транспорта в быстро развивающемся районе. Этот инструмент обеспечивает общую основу оценки для специалистов по городскому, транспортному и экономическому планированию, тем самым облегчая социологическое исследование, опрос жителей и выявление потенциально важной ин-

формации, необходимой для улучшения интеграции экономики, землепользования и транспорта в экономику развивающегося района.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дизайн пешеходной улицы: учеб. пособие / М. И. Белов, С. М. Михайлов, А. С. Михайлова, Ю. В. Назаров. – Казань: Дизайн-квартал, 2012. – 150 с.
2. Brian J. L. Berry Cities as systems within systems of cities / Papers in Regional Science, 1964, Vol. 13, Issue 1, p. 147-205.
3. Chen, X., Orum, A., &#38; Paulsen, K. (2012). Introduction to Cities (1st ed.). Wiley. Retrieved from <https://www.perlego.com/book/1013857/introduction-to-cities-pdf> (Original work published 2012).
4. Yuan Ji Xia, Zhang Weihua, et. al. Study of set condition of pedestrian overpass on urban road sections / Journal of Hefei university of technology, 2010, Vol. 33 (10), p. 1450-1453.
5. Bert van Wee (2013) Urban Form and Transport Accessibility, Journal of Environmental Policy & Planning, 15:2, 323-324, DOI: 10.1080/1523908X.2013.797681.
6. Jonas, A., McCann, E., Thomas, M. (2015). Urban Geography (1st ed.). Wiley. Retrieved from <https://www.perlego.com/book/1001438/urban-geography-a-critical-introduction-pdf> (Original work published 2015).
7. 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.
8. Сохацкая, Д. Г. Влияние политической идеологии на предметно-пространственную среду российского города (на примере г. Комсомольска-на-Амуре) / Д. Г. Сохацкая, Т. М. Михайлова // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о человеке, обществе и культуре. – 2021. – № VIII-2 (56). – С. 60-65.
9. Филобок, А. А. Современные особенности урбанизации в России / А. А. Филобок, О. В. Антонов // Молодой учёный. – 2022. – № 9 (404). – С. 60-63.

Сохацкая Д. Г., Чусова Е. А.  
D. G. Sokhatskaya, E. A. Chusova

## ВЛИЯНИЕ РЕНОВАЦИИ ФАСАДОВ ЖИЛЫХ МНОГОКВАРТИРНЫХ ЗДАНИЙ НА ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

### INFLUENCE OF RENOVATION OF FACADES OF RESIDENTIAL APARTMENT BUILDINGS ON ENGINEERING SYSTEMS

**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, Architectural Environment Design Department, Komsomolsk-na-Amure State University, Member of the Union of Designers of Russia (Russia, Komsomolsk-on-Amur); tel. 8(962)288-02-68. E-mail: amurliman-design@yandex.ru.

**Чусова Екатерина Анатольевна** – магистр Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре). E-mail: ivahnenko.ekaterina.1998@mail.ru.

**Ekaterina A. Chusova** – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur). E-mail: ivahnenko.ekaterina.1998@mail.ru.

**Аннотация.** В статье рассмотрены основные аспекты влияния реновации фасадов жилых домов на инженерные системы здания, а также выявлены проблемы, с которыми может столкнуться архитектор при реконструкции фасадов существующих зданий.

**Summary.** The article discusses the main aspects of the impact of the renovation of the facades of residential buildings on the engineering systems of the building, and also identifies the problems that an architect may encounter when reconstructing the facades of existing buildings.

**Ключевые слова:** инженерные системы зданий, реновация фасадов, жилые здания.

**Key words:** building engineering systems, facade renovation, residential buildings.

УДК 728

В настоящее время основным элементом планировочной структуры городов являются много квартирные жилые дома, оснащённые всеми видами инженерного оборудования для нормальной жизнедеятельности [1].

Инженерное оборудование – это комплекс технических устройств, предназначенных для комфортных условий быта и трудовой деятельности населения, коммунальных и промышленных предприятий. Для проектирования и реновации очень важно изучить все инженерные системы дома, т. к. заблаговременная опережающая инженерная подготовка сетей поможет повысить привлекательность территории для реализации инвестиционных проектов жилищно-гражданского строительства [1].

Есть несколько способов реновации (улучшения, реконструкции без разрушения целостности) фасадов жилых домов:

1. лёгкая реставрация (ремонт) – изменение цвета здания, починка различных несовершенств;
2. применение частичной реставрации, изменение части здания для придания ему нового и современного вида;
3. полная реновация фасадов здания с облицовкой и частичной перестройкой, изменением самой конфигурации здания и его планировочного решения.

Инженерные сети являются основным элементом благоустройства городских территорий, т. к. даже озеленение улиц и микрорайонов должно проводиться после согласования их расположения.

жения. Это комплексная система, объединяющая все подземные, наземные и надземные сети и сооружения [2].

За фасадом любого уже построенного жилого здания скрываются инженерные системы, обеспечивающие его нормальное функционирование.

Все системы здания делятся на наружные и внутренние. Они классифицируются следующим образом:

1. Теплоснабжение, которое может быть центральным и местным. Функциональные составляющие: котёл, тепловые сети и радиаторы отопления [9].

2. Водоснабжение, водоотведение, канализация, система пожаротушения, где основными элементами являются водопровод, водозаборные сооружения и водоводы, как правило, они располагаются внутри здания, но если крыша имеет скаты, тогда монтируется наружный водоотвод [9].

Изменение фасадов здания может также повлиять на водоотведение с крыши дома, что привлечёт за собой некоторые проблемы (скопление воды, намокание стен) и уменьшит срок службы здания.

При плоской крыше водоотвод (см. рис. 1), как правило, спрятан внутри здания и будет изменён только при масштабной реконструкции с изменением перепланировки.

При скатной крыше водоотвод (см. рис. 2) будет наружный, и при реконструкции важно учитывать его размещение и возможный перенос с обеспечением выполнения его основной задачи – водоотведения.

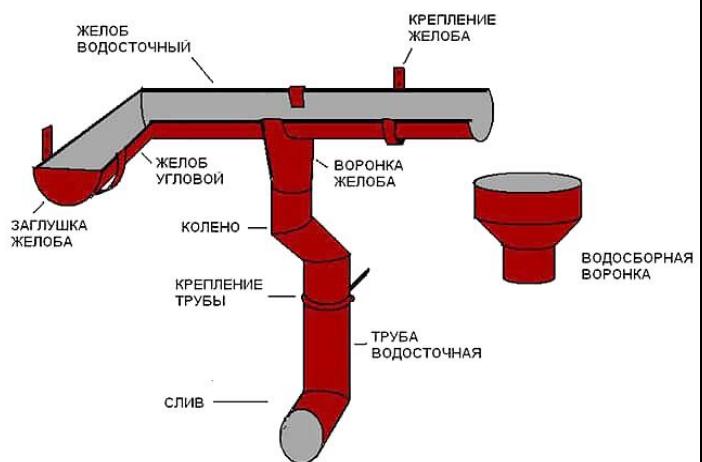
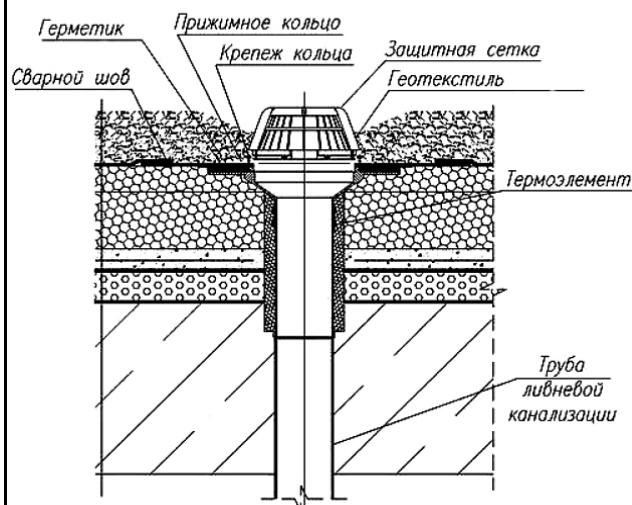


Рис. 2. Устройство водоотвода на скатной крыше

Рис. 1. Внутренний водоотвод [4]

К примеру, в готической архитектуре применялись интересные решения для водоотведения воды с крыши. Одной из отличительных черт данного течения в архитектуре является установка различных скульптур – гаргулий (см. рис. 3). Они выполняли не только декоративную функцию, но и служили водоотводом [10].

Согласно легенде, в стародавние времена около Руана обитал дракон по имени Гаргулья, который мог извергать не только огонь, но и воду. Он не давал местным жителям спокойно жить. За истребление взялся епископ Роман Руанский, благодаря молитвам он смог приручить дракона. Однако руанцы не поверили в это и сожгли Гаргулью, осталась только голова, её и прикрепили к карнизу собора как символ торжества над силами зла [10].

Сейчас в архитектуре используют современные способы водоотведения с крыши. Для плоской крыши применяются внутренние водостоки, для скатной – наружные различных видов. Устройство наружных водоотводов одинаковое, но визуально они могут отличаться в зависимости от стиля здания, и тут всё зависит от фантазии архитектора (см. рис. 4).



Рис. 3. Гаргулья, выполняющая функцию водоотвода [4]

Если изменение фасада предполагает частичную внутреннюю перепланировку здания, то это также может повлиять на канализацию и водоснабжение, поэтому проектом необходимо предусматривать новое расположение стояков канализации и размещение труб холодного и горячего водоснабжения, для того чтобы не нарушить систему.



Рис. 4. Примеры применения наружного водоотвода для скатной крыши [11; 12]

3. Наружное освещение. Это относится не только к освещению территории, но и к декоративному освещению самого здания, что необходимо учитывать, т. к. это влияет непосредственно на фасад здания. Архитектурная подсветка подчёркивает его отдельные элементы, что помогает представить строение по-новому в выгодном положении и расставить акценты [9].

4. Энергопотребление. Это основная инженерная коммуникация, т. к. современное оборудование работает при помощи электричества. При реновации фасадов важно учитывать подведение линий электропередач, а также предусматривать реновацию подстанции, находящейся в районе, если она влияет на общее восприятие здания в комплексе [9].

5. Вентиляция и кондиционирование. Как правило, в современных зданиях устраивается внутренняя шахта для вентиляции, и она никак не влияет на фасады. А вот современные кондиционеры имеют выносные блоки для забора воздуха с улицы, и устраиваются они на фасаде. Это важно учитывать не только при реновации, но и при строительстве новых зданий [9]. Чаще всего на фасаде предусматривается специальная корзина для таких блоков, гармонично вписывающаяся в ритм фасадов (см. рис. 5).



Рис. 5. Пример применения корзин для кондиционеров на фасаде здания [13]

Изменение фасада и отделка новым материалом могут повлиять на вентиляцию. Если проект нового фасада не будет учитывать вентиляционные отверстия в пространстве между новым и старым фасадом, то будет образовываться конденсат, что может привести к более глобальным проблемам, как, например, разрушение фасада от постоянного воздействия влаги. Или фасад будет перекрывать естественную вентиляцию через окна, что нарушит внутреннюю систему вентиляции помещений. Поэтому он должен быть обязательно вентилируемым и соответствовать всем необходимым требованиям.

Вентилируемый фасад (см. рис. 6) – система, состоящая из облицовочных материалов, которые крепятся на стальной оцинкованный, стальной нержавеющий или алюминиевый каркас к несущему слою стены или к монолитному перекрытию. По зазору между облицовкой и стеной свободно циркулирует воздух, который убирает конденсат и влагу с конструкций [3].

Теплофизические расчёты вентилируемого фасада включают теплотехнический, влажностный расчёт и расчёт воздухопроницаемости ограждающей конструкции. При определении толщины теплоизоляции учитываются воздухообмен в зазоре вентилируемого фасада и влияние металлических теплопроводных включений с помощью коэффициента теплотехнической неоднородности или с помощью расчёта температурных полей [3].

Вентилируемые фасады выполняют и важную декоративную функцию. Во-первых, облицовочные кассеты могут быть покрашены в любой цвет и иметь различную форму (в том числе нестандартную, фигурную). Во-вторых, вентилируемый фасад – это отличный способ скрыть такие недостатки фасада, которые едва ли можно оперативно изменить: неровности, трещины, остатки прежних элементов отделки [3].

6. Газоснабжение. Система газоснабжения состоит из магистральных газопроводов, газораспределительных станций, распределительных газопроводов, газорегуляторных пунктов, разводящих газопроводов низкого давления и вводов потребителям.

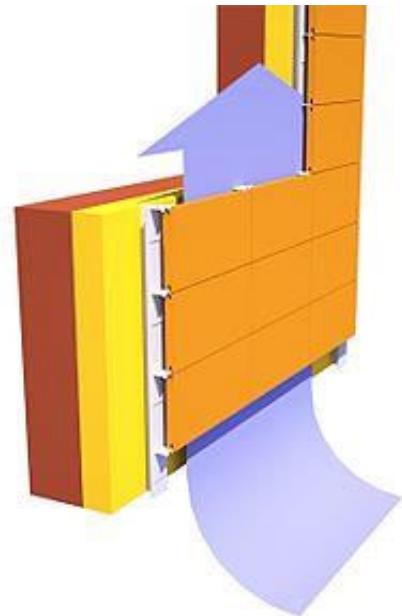


Рис. 6. Внутреннее устройство вентилируемого фасада. Стрелка показывает направление циркуляции воздуха [3]

Обычно газовая труба устраивается снаружи над землёй и по правилам установки окрашивается в жёлтый цвет, что влияет на восприятие фасада [9].

При масштабной реновации может измениться расположение газовых труб (если они установлены над землёй), поэтому важно учитывать уже существующее расположение и предусматривать возможные варианты переноса (см. рис. 7).

При переносе трубы необходима разработка дополнительного проекта (созданного по нормативным документам), согласованного с газовыми службами. Также можно предусмотреть на фасаде открытый канал-выемку для трубы и таким образом объединить фасад и трубу. Или вписать уже существующую трубу в цветовое решение фасада.



Рис. 7. Возможное расположение газовой трубы и её сочетание с фасадом здания [6]

Таким образом, при реновации фасадов жилых домов и любых других зданий нужно учитывать не только эстетическую составляющую, но и инженерные системы здания, для того чтобы не нарушить функциональность здания и не уменьшить срок его службы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Музалевская, Г. Н. Инженерные сети городов и населённых пунктов: учеб. пособие / Г. Н. Музалевская. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. – 148 с.
2. Городские инженерные сети // [zavantag.com](https://zavantag.com/), 2000-2013 гг. – URL: <https://zavantag.com/docs/index-4154852.html> (дата обращения 05.08.2022). – Текст: электронный.
3. Вентилируемый фасад // Википедия – свободная энциклопедия. – URL: <https://ru.wikipedia.org> (дата обращения: 05.08.2022). – Текст: электронный.
4. Отведение воды с кровли // АртКровли. – URL: <https://xn--b1afkqgn.xn--p1ai/otvedenie-vody-s-krovli> (дата обращения: 05.08.2022). – Текст: электронный.
5. Как сделать водоотвод с кровли – пошаговое устройство системы // Крыша дома. – URL: <https://kryshadoma.com/vodostok/kak-sdelat-vodootvod-s-krovli-poshagovoe-ustroystvo-sistemy.html> (дата обращения: 05.08.2022). – Текст: электронный.
6. Можно ли закрыть газовую трубу сайдингом: правила и тонкости маскировки газопровода // Совет инженера. – URL: <https://sovet-ingenera.com/gaz/docs/mozhno-li-zakryt-gazovuyu-trubu-sayingom.html> (дата обращения: 05.08.2022). – Текст: электронный.
7. СП 30.13330.2020. Внутренний водопровод и канализация зданий = Internal water supply and sewerage of buildings: утверждён и введён в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 30 декабря 2020 г. № 920/пр: дата введения 2021-07-01 / подготовлен Де-

партаментом градостроительной деятельности и архитектуры Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573741260> (дата обращения: 05.08.2022). – Текст: электронный.

8. СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха = Heating, ventilation and air conditioning: утверждён и введён в действие приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 30 декабря 2020 г. № 921/пр: дата введения 2021-07-01 / подготовлен Департаментом градостроительной деятельности и архитектуры Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573697256> (дата обращения: 05.08.2022). – Текст: электронный.

9. Инженерные системы зданий // Электро, 2021. – URL: <https://www.elektro-expo.ru/ru/articles/inzhenernye-sistemy-zdaniy/> (дата обращения: 05.08.2022). – Текст: электронный.

10. Почему европейские соборы украшают гаргульи // Фактум, 2022. – URL: <https://www.factroom.ru/kultura/pochemu-evropejskie-sobory-ukrashayut-garguli> (дата обращения: 05.08.2022). – Текст: электронный.

11. Водосточная система Galeco // Славдом, 2022. – URL: <https://slavdom.ru/catalog/p/55880-kollektsiya-galeco-stal-125-80kh80-mm-chernyy-ral-9005/> (дата обращения: 05.08.2022). – Текст: электронный.

12. Водосточные системы кровли ROOFART // Пульс, 2022. – URL: [https://kazan.pulscen.ru/products/vodostochnye\\_sistemy\\_krovli\\_roofart\\_aquasystem\\_grandline\\_docke\\_met\\_i\\_plast\\_41385521](https://kazan.pulscen.ru/products/vodostochnye_sistemy_krovli_roofart_aquasystem_grandline_docke_met_i_plast_41385521) (дата обращения: 05.08.2022). – Текст: электронный.

13. Корзины для кондиционеров // Металлстрой, 2022. – URL: <https://zaborsp.ru/korzina-kondicioner> (дата обращения: 05.08.2022). – Текст: электронный.

14. 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.

**Памяти профессора Евгения Леонидовича Ерёмина (1948–2023)**



1 июня 2023 года на 75-м году ушёл из жизни Евгений Леонидович Ерёмин, Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, доктор технических наук, профессор кафедры информационных и управляемых систем, главный научный сотрудник лаборатории моделирования, обработки информации и управления Амурского государственного университета, действительный член Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова.

Евгений Леонидович – автор и соавтор более 580 научных и учебно-методических работ, в том числе 12 монографий, 103 патентов РФ на изобретения (79) и полезные модели (24), а также обладатель 63 свидетельств РФ о регистрации программ для ЭВМ. Ерёмин Е. Л. активно участвовал в воспитании и подготовке специалистов высшей квалификации, был членом двух докторских советов, являлся научным консультантом 1 доктора наук и научным руководителем 11 кандидатов наук.

Область его научных интересов – синтез систем автоматического управления в условиях априорной неопределённости, анализ математических и компьютерных моделей физических и технологических объектов, системный анализ в задачах медицинской диагностики.

В 2001 году Евгений Леонидович Ерёмин основал научно-теоретический журнал «Информатика и системы управления» и по настоящее время являлся его главным редактором.

Евгений Леонидович родился 6 июля 1948 года. В 1966 году окончил энергетический факультет Фрунзенского политехнического института, был Ленинским стипендиатом.

В 1984 году защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Техническая кибернетика и теория информации», а в 1994 году – докторскую диссертацию по специальности «Управление в технических системах».

В 1993 году Евгений Леонидович был приглашён в Благовещенский технологический институт (ныне Амурский государственный университет) на должность доцента кафедры автоматизации технологических процессов и производств. В 1994 году был избран заведующим кафедрой автоматизированных систем обработки информации и управления, а в 1995 году – деканом факультета математики и информатики Амурского государственного университета. Заслуги профессора Ерёмина в становлении и развитии факультета невозможно переоценить. Ему удалось сформировать сплочённый научно-педагогический коллектив факультета, определить основные направления научных исследований преподавателей.

С октября 2009 года по май 2012 года Евгений Леонидович был проректором по научной работе и информатизации Тихоокеанского государственного университета, а с мая 2012 года и по настоящее время работал в должности профессора кафедры информационных и управляемых систем АмГУ.

Администрация и сотрудники Комсомольского-на-Амуре государственного университета выражают искренние соболезнования родственникам и друзьям Евгения Леонидовича по поводу безвременной кончины замечательного человека, преподавателя-исследователя, настоящего Учёного с большой буквы.

# Содержание

Научное издание

## АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Колыхалов Г. А., Кравченко Е. Г.

ВЛИЯНИЕ ТЁМНОЙ МАТЕРИИ НА ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ

КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ С ПОЗИЦИИ МОДЕЛИ СПЛОШНОЙ СРЕДЫ ..... 4

## ЭНЕРГЕТИКА

Ким К. И., Ким К. К., Иванов С. Н.

О НЕУСТОЙЧИВОСТИ ОБРАЗОВАНИЙ ИЗ СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ  
ПЛАЗМЫ В МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ ..... 12

Янченко А. В., Чураков А. Е.

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УНИПОЛЯРНОГО ГЕНЕРАТОРА  
С КАТЯЩИМСЯ ТОКОСЪЁМОМ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА  
ИМПУЛЬСНОГО ТОКА ДЛЯ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ ..... 20

В. И. Шаломов

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК НОВОЙ  
СОВЕТСКО-ГАВАНСКОЙ ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ ..... 28

## УПРАВЛЕНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

Черный С. П., Бузикаева А. В., Годяев А. И., Давыдов Ю. А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЧЁТКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА  
НА ОСНОВЕ ВЕКТОРНО-МАТРИЧНОГО ОПИСАНИЯ ..... 35

Х. Уламбаяр, Дмитриева Т. Л.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КАРКАСНЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ С ОПТИМАЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «ОКАГЭ» ..... 42

Младова Т. А., Муллер Н. В., Неведомский А. Д., Младов А. С.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ  
СРЕДЫ ВЫБРОСАМИ АВТОЗАПРАВОЧНЫХ СТАНЦИЙ ..... 51

Носков С. И.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОСТОЙ ФОРМЫ  
ВЛОЖЕННОЙ КУСОЧНО-ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ ..... 57

Черный С. П., Емельянов К. А., Духнов Н. Н., Сотников И. А., Годяев А. И.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТОЙ НЕЧЁТКОЙ СИСТЕМЫ  
УПРАВЛЕНИЯ МНОГОСВЯЗНЫМ ОБЪЕКТОМ  
В УСЛОВИЯХ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОСТИ ..... 62

Ким К. К., Иванов С. Н., Дружинин В. А., Шевченко Я. Е., Азимов Х. Х.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ  
ЛЬДООБРАЗОВАНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ ..... 70

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

Сарилов М. Ю., Отряскина Т. А., Курильченко М. С.

СЖИГАНИЕ ВОДОМАЗУТНОЙ ЭМУЛЬСИИ В КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ ..... 78

Мокрицкий Б. Я., Саблин П. А., Григорьев В. В., Шелковников В. Ю.

КЕРАМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ НА ТВЁРДОСПЛАВНОМ ИНСТРУМЕНТЕ  
ДЛЯ ТОЧЕНИЯ НЕРЖАВЕЮЩИХ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ СТАЛЕЙ ..... 82

Джемилов Э. Ш., Джемалядинов Р. М., Курманов Р. Д., Сейдалиев Р. С.

ПРИМЕНЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ СОТС ПРИ ОБРАБОТКЕ  
КОНИЧЕСКИХ ОТВЕРСТИЙ АЛМАЗНЫМ ХОНИНГОВАНИЕМ ..... 90

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ И БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНEDЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

Коротеева Л. И., Медведев К. А.

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ МНОГОКОНТУРНЫХ ЗЕМЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ ..... 97

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Маначенко В. А., Галкина Е. Г.

СИНТЕЗ НАУК В ДИЗАЙНЕ КАК МЕТОД  
КОМПЛЕКСНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ (ВИМ-ТЕХНОЛОГИИ) ..... 102

Гринкруг Н. В., Ефимова К. С.

МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ ГОРОДСКОГО ПРОСТРАНСТВА ПОСРЕДСТВОМ  
РАЗВИТИЯ, ОРИЕНТИРОВАННОГО НА ТРАНЗИТНЫЕ СООБЩЕНИЯ ..... 110

Сохацкая Д. Г., Чусова Е. А.

ВЛИЯНИЕ РЕНОВАЦИИ ФАСАДОВ ЖИЛЫХ МНОГОКВАРТИРНЫХ  
ЗДАНИЙ НА ИНЖЕНЕРНЫЕ СИСТЕМЫ ..... 116

## НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ

ПАМЯТИ ПРОФЕССОРА ЕВГЕНИЯ ЛЕОНИДОВИЧА ЕРЁМИНА ..... 122

Учёные записки КнАГТУ

2023 № III (67)

Науки о природе и технике

Выпускающий редактор  
С. Н. Иванов

Подписано в печать 26.06.2023  
Дата выхода в свет 28.06.2023

Формат А4.

Бумага офисная 80 г/м<sup>2</sup>.

Усл. печ. л. 13,63.

Уч.-изд. л. 17,18.

Тираж 200. Заказ 30894

Отпечатано в типографии

КнАГУ

681013,

г. Комсомольск-на-Амуре,  
пр. Ленина, д. 27.

