

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

**Солецкий В. В., Нюняйкина М. С., Перевалов А. А., Куриный В. В.**  
**V. V. Soletsky, M. S. Nyunaykina, A. A. Perevalov, V. V. Kurinyi**

**ДВУХСРЕДНЫЙ БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ**

**TWO-MEDIUM UNMANNED AERIAL VEHICLE**

**Солецкий Вячеслав Вадимович** – студент группы 4ТС1 самолётостроительного факультета Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел.: + 7 (929) 401-87-77. E-mail: [ssf@knastu.ru](mailto:ssf@knastu.ru).

**Mr. Vyacheslav V. Soletsky** – a student, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel.: + 7 (929) 401-87-77. E-mail: [ssf@knastu.ru](mailto:ssf@knastu.ru).

**Нюняйкина Марина Сергеевна** – студентка группы 5ТС1 самолётостроительного факультета Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел.: + 7 (924) 211-88-00. E-mail: [ssf@knastu.ru](mailto:ssf@knastu.ru).

**Ms. Marina S. Nyunaykina** – a student, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel.: + 7 (924) 211-88-00. E-mail: [ssf@knastu.ru](mailto:ssf@knastu.ru).

**Перевалов Анатолий Анатольевич** – кандидат технических наук, ведущий инженер-проектировщик Балтийского инжинирингового центра машиностроения (Россия, Калининград); 236022, г. Калининград, ул. Гайдара, 6. E-mail: [Anatoly84@rambler.ru](mailto:Anatoly84@rambler.ru).

**Mr. Anatoly A. Perevalov** – PhD in Engineering, leading design engineer of the Baltic Engineering Center for Machine Building (Russia, Kaliningrad); 236022, Kaliningrad, 6 Gaidar str. E-mail: [Anatoly84@rambler.ru](mailto:Anatoly84@rambler.ru).

**Куриный Владислав Викторович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой систем автоматизированного проектирования Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: [kmtlp@knastu.ru](mailto:kmtlp@knastu.ru).

**Mr. Vladislav V. Kurinyi** – PhD in Engineering, head of the Department of Computer Aided Design, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: [kmtlp@knastu.ru](mailto:kmtlp@knastu.ru).

**Аннотация.** В статье представлен анализ основных направлений развития беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Отмечен интерес, проявляемый в мире к развитию двухсредных БПЛА. Приведены разработанные на данный момент двухсредные БПЛА. На основании анализа существующих схем двухсредных летательных аппаратов с учётом их слабых мест и недостатков предложена новая компоновочная схема БПЛА в виде конвертоплана. Описаны внешний вид и особенности устройства. Рассчитаны аэродинамические характеристики конвертоплана. Приведены исходные данные для аэродинамического расчёта. Построены поляры зависимостей  $C_{xa}(C_{ya})$  и  $K(C_{ya})$ . Описаны особенности изготовления корпуса БПЛА с применением FDM-технологии на 3D-принтере. Представлены результаты проведённой работы.

**Summary.** The article presents an analysis of the main directions of development of unmanned aerial vehicles (UAVs). The interest shown in the world to the development of two-medium UAVs is noted. Given developed at the moment, dvuhsvetny UAV. Based on the analysis of the existing schemes of two-medium aircraft, taking into account their weaknesses and shortcomings, a new layout scheme of the UAV in the form of a tiltrotor is proposed. The appearance and features of the device are described. Aerodynamic characteristics of the tiltrotor are calculated. The initial data for aerodynamic calculation are given. Built polars dependency. Describes the features of the construction of the hull of the UAV with the use of FDM technology in 3D printer. The results of the work are presented.

**Ключевые слова:** БПЛА, двухсредный аппарат, конвертоплан, квадрокоптер, 3D-печать.

**Key words:** UAV, two-medium unmanned aerial vehicle, tiltrotor, quadcopter, 3D-printing.

УДК 629.735

**Работа выполнена при поддержке программы «УМНИК» (Хабаровский край, Договор № 10978ГУ/2016 от 10.02.2017)**

В настоящее время отрасль беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является самой перспективной и активно развивающейся. Стимулом к развитию отрасли БПЛА во всём мире служит успешное и широкое использование их армиями США и Израиля в ходе военных операций (Персидский залив, Югославия, Сирия и т. п.). При этом беспилотники зарекомендовали себя как эффективное средство разведки, сопровождения боя; в качестве ложных мишеней, средств доставки грузов и выполнения прочих боевых задач [1].

Однако область применения БПЛА в гражданских целях не менее широка. Это признают фактически все представители стратегических отраслей экономики России. Возможности БПЛА сегодня представлены в решении задач от проведения природоохранных мероприятий до функций мониторинга состояния различных объектов энергетического, топливно-энергетического и железнодорожного комплексов, а также в решении задач предотвращения последствий ЧС природного и техногенного происхождения [2].

Американский еженедельник Aviation Week & Space Technology со ссылкой на аналитиков компании Forecast International в начале 2014 года сообщил, что объём мирового рынка БПЛА в период с 2014 по 2018 год составит 67,3 млрд долларов. Около 35,6 млрд долларов будет израсходовано на производство беспилотных аппаратов, 28,7 млрд долларов – на проведение НИОКР в области беспилотной техники, два-три млрд долларов – на сервисное обслуживание БПЛА. Расходы распределяются следующим образом: производство БПЛА – 14,2 млрд долларов, производство наземных станций управления – 6,6 млрд долларов, выпуск бортовых полезных нагрузок – 14,8 млрд долларов [2].

По оценке ассоциации «АЭРОНЕТ», на гражданском рынке присутствуют 190 +/- 20 компаний, работающих на рынке гражданских БПЛА, имеющих возраст не более трёх лет и имеющих штат до пяти сотрудников. Их суммарная выручка оценивается ассоциацией в 1400 +/- 500 млн рублей. Деятельность этих компаний включает:

- производство и продажу собственных БПЛА и их комплектующих;
- дистрибуцию иностранных дронов и комплектующих;
- предоставление услуг на базе БПЛА (30 % компаний) [3].

Наряду с БПЛА разрабатываются и самоходные автономные необитаемые подводные аппараты (САНПА), они полностью автономны в энергетическом отношении и полностью (или почти полностью) – в информационном. Самоходные автономные необитаемые подводные аппараты являются полным аналогом беспилотных летательных аппаратов, однако среды, в которых они действуют, отличаются тем, что плотность воды в 775 раз выше плотности воздуха. Принципиально различаются и условия распространения физических полей (акустического, электромагнитного, электрического).

Однако известны попытки создания аппаратов, способных двигаться как в воздухе, так и под водой; известны немногочисленные проекты двухсредных аппаратов – летающих подводных лодок (ЛПЛ). [3]. К таким проектам можно отнести ЛПЛ Ушакова, Американский RFS-1 Рейда, СПЛ-1 Четверикова и немногие другие. Все они были революционны, разрабатывались в середине XX века и проектировались как пилотируемые аппараты, однако, к сожалению, так и остались на уровне разработок. Из них самые известные Naviator, SubMurre, Loon Copter.

*Naviator* – американский беспилотный многоцелевой дрон-амфибия, разработанный специалистами Университета Рутгерса ВМС США. Он проектировался для эксплуатации не только в гражданской, но и военной сфере, что было обусловлено широкими функциональными и эксплуатационными возможностями этого летательного аппарата. *Naviator* был разработан в конфигурации мультикоптера, что позволяет летательному аппарату эксплуатироваться в любых условиях

местности, осуществляя взлёт и посадку в вертикальной плоскости, при этом имея довольно компактные размеры (см. рис. 1) [4].

Беспилотный летательный аппарат оборудован восемью электрическими двигателями, способными разогнать летательный аппарат до максимальной скорости полёта в 40 км/ч при автономности нахождения в воздухе до 30 мин [4].

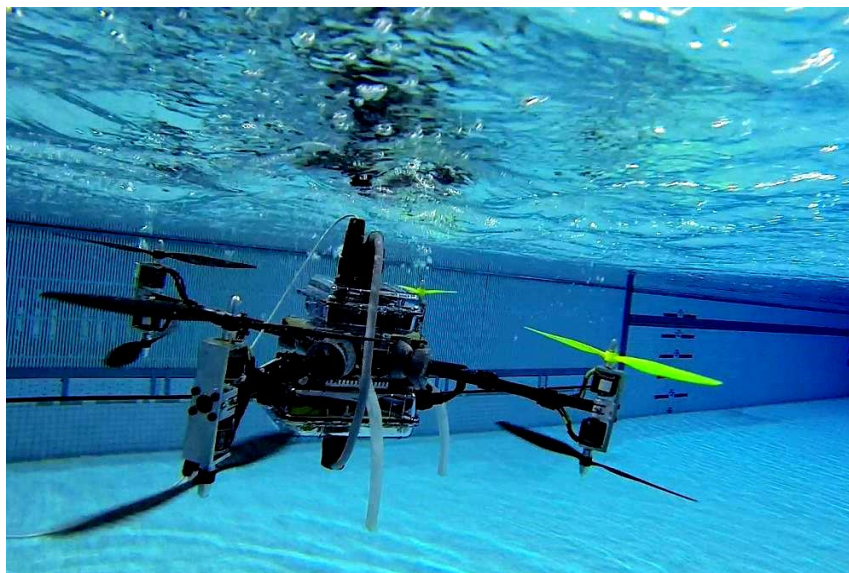


Рис. 1. Двухсредный беспилотный летательный аппарат Naviator

*SubMurre* – это беспилотная субмарина, способная совершать управляемый полёт. Она разработана компанией Inposop (см. рис. 2). Аппарат имеет все характерные черты субмарины: обтекаемый корпус, два винта, вертикальные, горизонтальные рули и даже подобие рубки, из которой может выдвигаться перископ. Для полёта по воздуху используются четыре традиционных ротора, которые прячутся внутрь корпуса в подводном положении. Аппарат оснащён датчиками и камерами, которые позволяют ему контролировать состояние окружающей среды и производить съёмку [6].



Рис. 2. Беспилотная летающая субмарина SubMurre

Источником энергии для двигателей и электронного оборудования является гибридная дизель-электрическая система. Дизельный двигатель может приводить в движение роторы аппарата напрямую и использоваться для подзарядки аккумуляторных батарей, из которых аппарат, находясь в подводном положении, черпает энергию [6].

Управление субмариной осуществляется дистанционно при помощи беспроводных технологий, аппарат не привязывается к базе кабелем даже во время работы в подводном положении [6].

На рис. 3 изображён *Loon Copter* – двухсредный беспилотный летательный аппарат, созданный специалистами из университета Окленда (Oakland University). Он летает точно таким же способом, как и любой другой квадрокоптер. Когда он касается поверхности воды, то плавает на поверхности в вертикальном положении, а чтобы погрузиться, использует свои балластные ёмкости [8].

Балластные ёмкости аппарата расположены таким образом, что после погружения он принимает горизонтальное положение. Передвижение под водой осуществляется с помощью медленного вращения роторов аппарата, слаженная работа которых даёт ему возможность неплохо маневрировать под водой.

Двигаясь по горизонтали при помощи роторов и по вертикали за счёт изменения количества воды в балластных ёмкостях, аппарат может вести видеосъёмку и собирать любые данные при помощи дополнительных датчиков [8].

Когда аппарату требуется вновь подняться на поверхность, он продувает балластные ёмкости и выныривает на поверхность, принимая вертикальное положение [8].

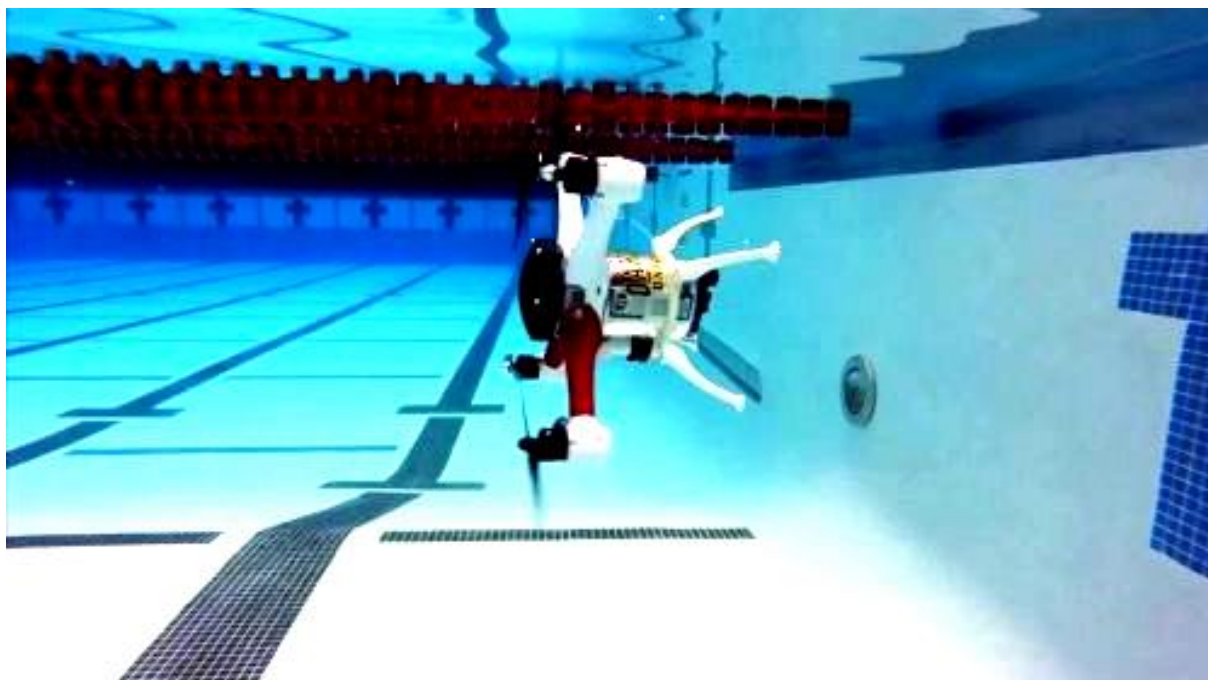


Рис. 3. Двухсредный беспилотный летательный аппарат Loon Copter

На основании анализа существующих схем двухсредных летательных аппаратов с учётом их слабых мест и недостатков нами предлагается новая компоновочная схема аппарата, которая позволит, на наш взгляд, получить лучшие лётно-технические и эксплуатационные характеристики.

Предлагаемый двухсредный БПЛА (см. рис. 4) выполнен в герметичном корпусе интегральной компоновки, имеющем в сечении форму аэродинамического профиля, с плавным переходом в консоли малого удлинения, поворачивающиеся вокруг поперечной оси и снабжённые электродвигателями с установленными в них воздушными винтами.

Таким образом, данный аппарат является конвертопланом, что позволяет получить ряд преимуществ. С консолями, поднятыми вертикально, аппарат может совершать взлёт и посадку, в том числе и на воду, без риска повреждения винтов и корпуса, а также зависать и разворачиваться на месте. А с консолями, опущенными горизонтально (далее – в горизонтальном положении), он движется «по-самолётному», что позволяет развивать высокую скорость и преодолевать большие расстояния как в воздухе, так и под водой при сравнительно меньшем энергопотреблении.

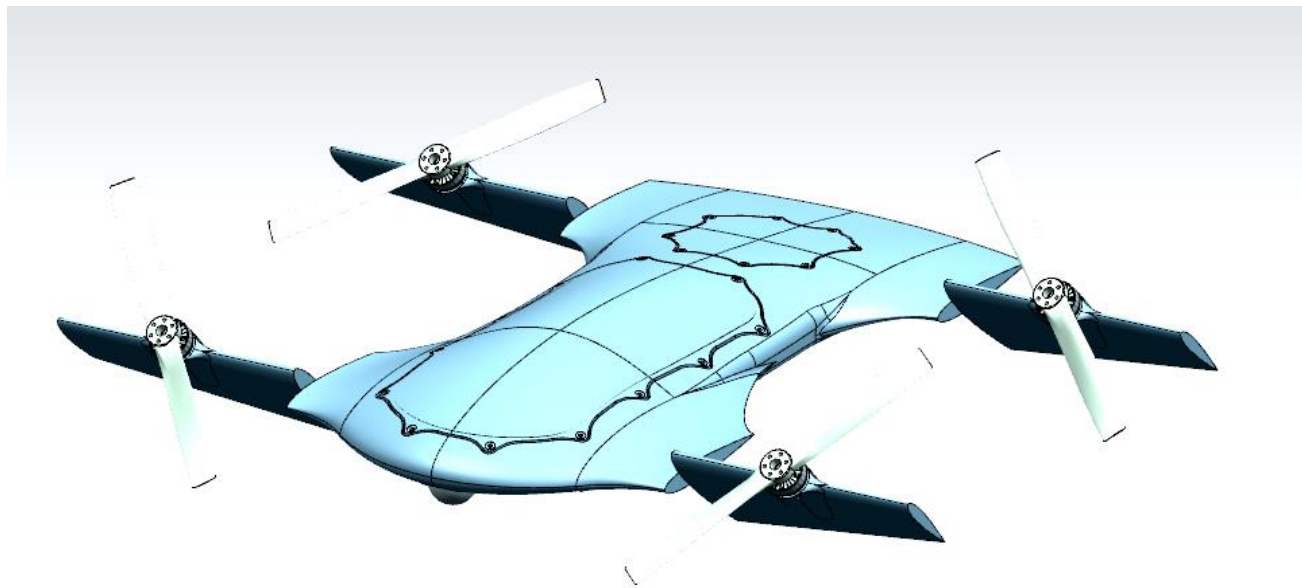


Рис. 4. Внешний вид разрабатываемого двухсредного беспилотного летательного аппарата

Кроме того, в горизонтальном положении, за счёт отклонения консолей на небольшие углы, можно полноценно управлять аппаратом, что позволяет избавиться от иной механизации.

Поворот консолей осуществляется сервоприводами через полый вал, установленный на подшипниках, внутри которого проложены провода, соединяющие электродвигатель и регулятор оборотов. Питание оборудования осуществляется от бортовых аккумуляторных батарей через распределитель питания, служащий также для контроля напряжения батареи и потребляемого тока, а функции стабилизации в воздухе и автопилота выполняет контроллер полёта. На аппарате предусмотрены небольшие балластные баки, наполняемые при необходимости в погружении.

В качестве привода винтомоторной группы используются бесколлекторные двигатели с электронной коммутацией обмоток, что позволяет отказаться от герметизации валопровода, а герметизировать только неподвижные кабельные вводы-выводы. На аппарате предусмотрена возможность дистанционного управления по радиоканалу, передачи данных телеметрии по выделенному цифровому каналу и передачи аналогового видеосигнала.

Габаритные размеры аппарата показаны на рис. 5.

Максимальную взлётную массу было решено ограничить 5 (пятью) кг, чтобы аппарат попал под классификацию мини-БПЛА ближнего действия.

В качестве расчёта аэродинамических характеристик двухсредного БПЛА проведём расчёт поляры зависимости коэффициента сопротивления самолёта от коэффициента подъёмной силы  $C_{xa}(C_{ya})$  и поляры зависимости аэродинамического качества от коэффициента подъёмной силы  $K(C_{ya})$  аппарата во время движения в горизонтальном положении.

Схема БПЛА подразумевает, что аппарат состоит из трёх крыльев – корпуса, выполненного в форме крыла (фюзеляж), переднего крыла (крыло), заднего крыла (горизонтальное оперение).

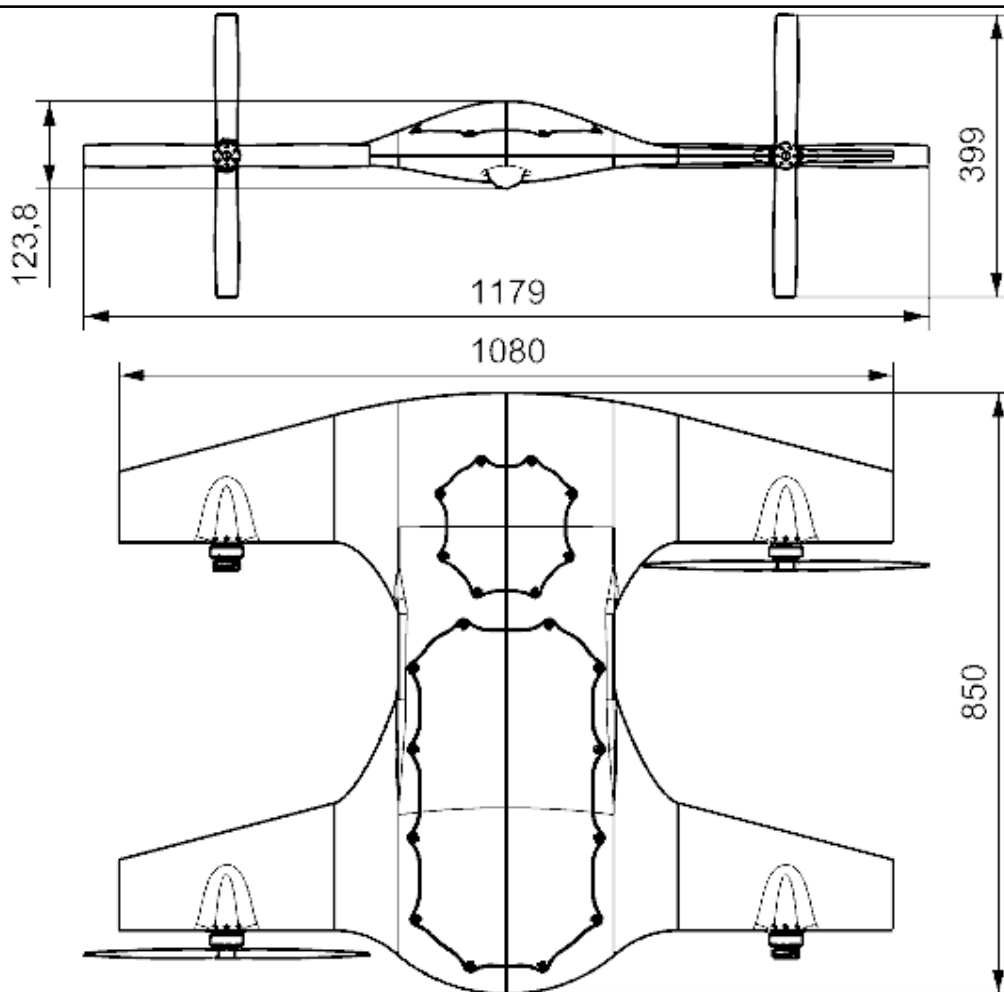


Рис. 5. Габаритные размеры двухсредного БПЛА

В табл. 1 приведены данные о БПЛА, которые были использованы для аэродинамических расчётов.

Таблица 1

Исходные данные для расчёта

Элемент самолёта, параметр	Размерность	Обозначение, формула	Значение
1. Крыло и горизонтальное оперение			
1.1. Размах крыла	м	$l$	1,08
1.2. Размах консолей крыла	м	$l_k = l - D_\phi$	0,78
1.3. Хорда центральная	м	$b_0$	0,28
1.4. Хорда концевая	м	$b_k$	0,1
1.5. Сужение в плане		$\eta_b = b_0 / b_k$	2,8
1.6. Площадь	м <sup>2</sup>	$S$	0,21
1.7. Хорда средняя	град	$b = S / l$	0,19



Продолжение табл. 1

Элемент самолёта, параметр	Размерность	Обозначение, формула	Значение
1.8. Стреловидность по линии максимальных толщин	град	$\chi_c$	-6
1.9. Стреловидность по линии 1/4 хорд	град	$\chi_{1/4}$	-5
1.10. Стреловидность по линии 1/2 хорд	град	$\chi_{1/2}$	-9,5
1.11. Стреловидность по передней кромке	град	$\chi_{п.к.}$	0
1.12. Геометрическое удлинение крыла		$\lambda = l^2 / S$	5,68
1.13. Геометрическое удлинение консолей крыла		$\lambda_k = l_k^2 / (S - S_\phi)$	4,73
1.14. Относительная толщина профиля центрального		$\bar{c}_0$	0,1
1.15. Относительная толщина профиля концевое		$\bar{c}_k$	0,14
1.16. Средняя относительная толщина профиля		$\bar{c} = (\bar{c}_0 \cdot \eta_b + \bar{c}_k) / (\eta_b + 1)$	0,11
1.17. Относительная координата максимальной толщины		$\bar{x}_c = x_c / b$	0,2
1.18. Относительная координата точки перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный		$\bar{x}_\tau$	0
1.19. Относительная кривизна профиля	%	$\bar{f}$	0
1.20. Относительная координата кривизны профиля		$\bar{x}_f$	0
1.21. Угол закрутки концевое сечения	град	$\varphi_k$	0
1.22. Угол атаки нулевой подъёмной силы	град	$\alpha_0$	0
1.23. Относительная площадь крыла, занятая фюзеляжем		$\bar{S}_\phi = S_\phi / S$	0,37
1.24. Относительная площадь крыла, занятая гондолами двигателей		$\bar{S}_{г.д} = S_{г.д} / S$	0,01
1.25. Относительная площадь, не участвующая в обтекании потоком		$\Sigma \bar{S}_i = \bar{S}_{г.д} + \bar{S}_\phi$	0,38
1.26. Множитель		$k_{эф}$	1
1.27. Удлинение эффективное		$\lambda_{эф} = \lambda / (1 + \Sigma \bar{S}_i)$	4,1
1.28. Производная коэффициента подъёмной силы по углу атаки	1/град	$C_{ya}^\alpha$	0,03
<b>2. Фюзеляж</b>			
2.1. Размах	м	$l$	0,3
2.2. Хорда центральная	м	$b_0$	0,85
2.3. Хорда концевая	м	$b_k$	0,79

Продолжение табл. 1

Элемент самолёта, параметр	Размерность	Обозначение, формула	Значение
2.4. Сужение в плане		$\eta_b$	1,08
2.5. Площадь	$m^2$	$S$	0,25
2.6. Хорда средняя	м	$b$	0,83
2.7. Стреловидность по линии тах-х толщин	град	$\chi_c$	0
2.8. Стреловидность по линии 1/4 хорд	град	$\chi_{1/4}$	0
2.9. Стреловидность по линии 1/2 хорд	град	$\chi_{1/2}$	0
2.10. Стреловидность по передней кромке	град	$\chi_{п.к.}$	0
2.11. Геометрическое удлинение крыла		$\lambda$	0,36
2.12. Относительная толщина профиля центрального		$\bar{c}_0$	0,14
2.13. Относительная толщина профиля концевого		$\bar{c}_к$	0,11
2.14. Средняя относительная толщина профиля		$\bar{c}$	0,13
2.15. Относительная координата максимальной толщины		$x_c$	0,2
2.16. Относительная координата точки перехода ламинарного пограничного слоя в турбулентный		$\bar{x}_т$	0,2
2.17. Относительная кривизна профиля	%	$\bar{f}$	2,5
2.18. Относительная координата кривизны профиля		$\bar{x}_f$	0,25
2.19. Угол закрутки концевого сечения	град	$\varphi_к$	0
2.20. Угол атаки нулевой подъёмной силы	град	$\alpha_0$	-2,69
2.21. Множитель		$k_{эф}$	1
2.22. Удлинение эффективное		$\lambda_{эф}$	0,361
2.23. Производная коэффициента подъёмной силы по углу атаки	1/град	$C_{ya}^\alpha$	0,017
3. Гондолы двигателя			
3.1. Длина	м	$l_{г.д.}$	0,069
3.2. Диаметр миделя	м	$D_{г.д.}$	0,051
3.3. Площадь миделя	$m^2$	$S_{г.д.}$	0,04
3.4. Относительная площадь миделя		$\bar{S}_{г.д.} = S_{г.д.} / S$	0,2
3.5. Удлинение		$\lambda_{г.д.}$	1,35

Элемент самолёта, параметр	Размерность	Обозначение, формула	Значение
<b>4. Воздушный винт</b>			
4.1. Диаметр	м	$D_B$	0,356
4.2. Расстояние от плоскости винта до $\frac{1}{4}$ хорды крыла по оси двигателя	м	$x_B$	0,071
4.3. Площадь, ометаемая винтом	м <sup>2</sup>	$S_{ом} = \pi \cdot D_B^2 / 4$	0,099
4.4. Относительная площадь крыла, обдуваемая винтами		$\bar{S}_{обд}$	0,622
<b>5. Общие данные</b>			
5.1. Взлётная масса самолёта	кг	$m_0$	5
5.2. Расчётная скорость полёта	км/ч	$V$	72
5.3. Расчётная высота полёта	км	$H$	0
5.4. Тип и количество двигателей		$n$	4
5.5. Стартовая тяга одного двигателя при $V=0, H=0$ ; винт 14 дюймов, 18 ампер	дан	$P_{oi}$	0,16

По данным, приведённым в табл. 1, был произведён аэродинамический расчёт аппарата, результатом которого стали поляры зависимости  $K(C_{ya})$  и  $C_{xa}(C_{ya})$  (см. рис. 6 и 7).

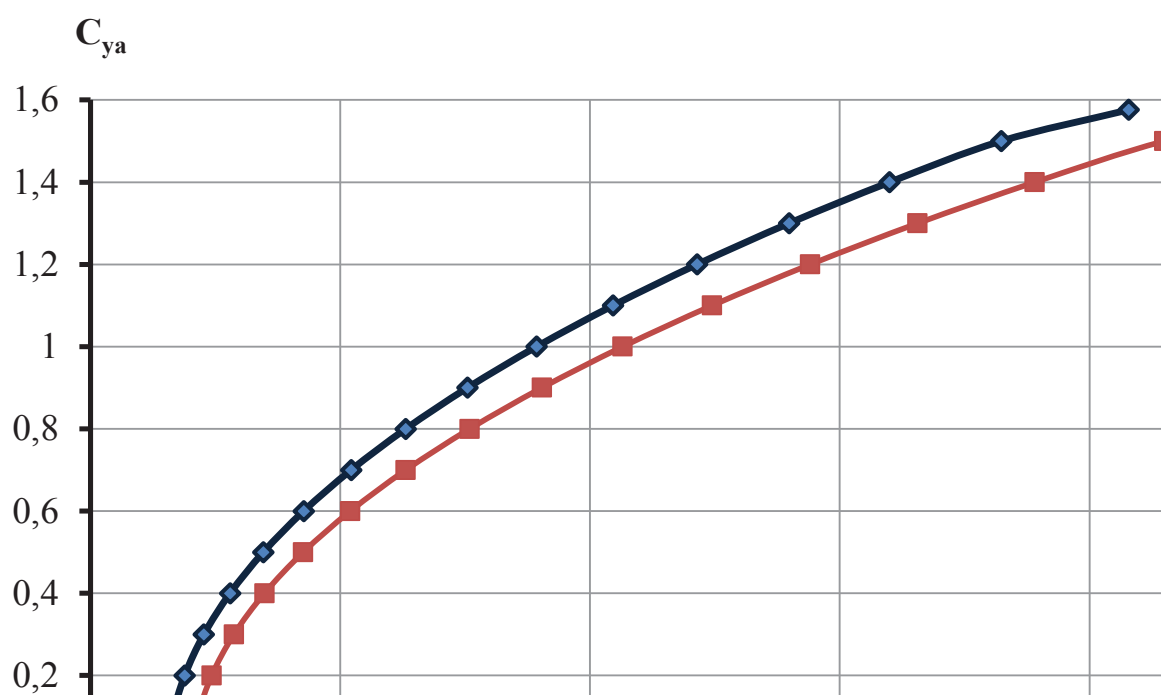


Рис. 6. Поляра зависимости  $C_{xa}(C_{ya})$

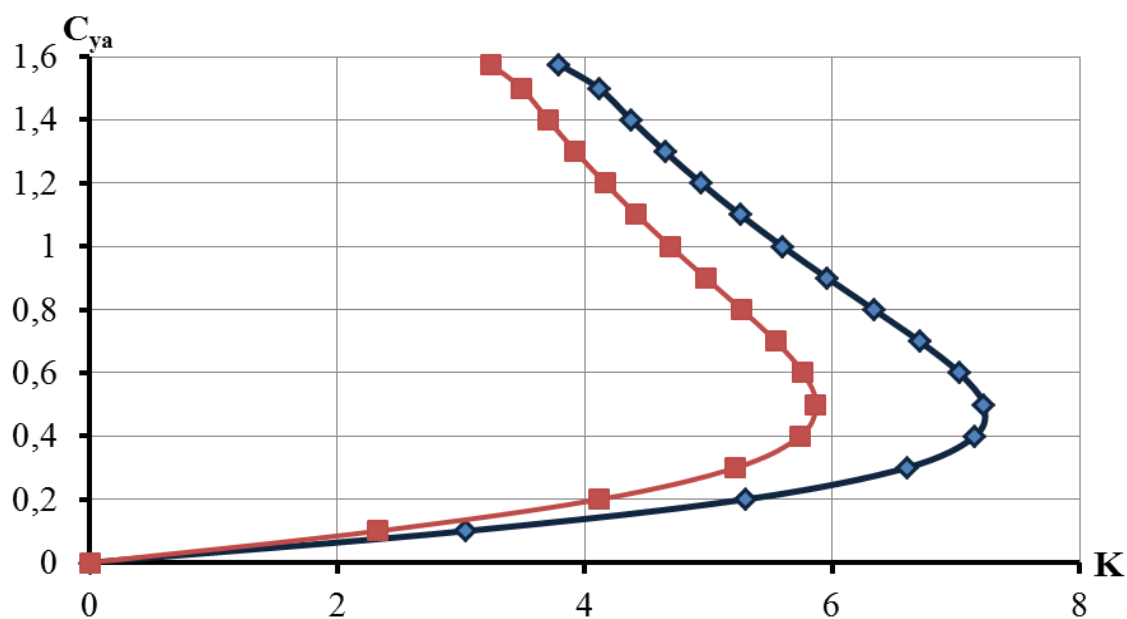


Рис. 7. Поляра зависимости  $K(C_{ya})$

Корпус, консоли, крышки и крепёжные детали прототипа изготавливались методом FDM 3D-печати, что позволило сэкономить время на прототипирование и получить точные внешние обводы. В качестве пластика был выбран PLA-пластик, он не токсичен, так как производится из кукурузы или сахарного тростника, имеет минимальную усадку и гладкую поверхность напечатанных деталей; кроме того, легко окрашивается и подвергается механической обработке, обладает стойкостью к большинству растворителей.

Из-за габаритных размеров аппарата, а также сложности внешнего обвода печать корпуса одной деталью не представляется возможной. Поэтому было решено разделить корпус на 12 деталей, соединяемых между собой при сборке посредством штифтов и клея, как это показано на рис. 8. В свою очередь, каждая из крышек была разделена только на две детали, а консоли и вообще печатались целиком.

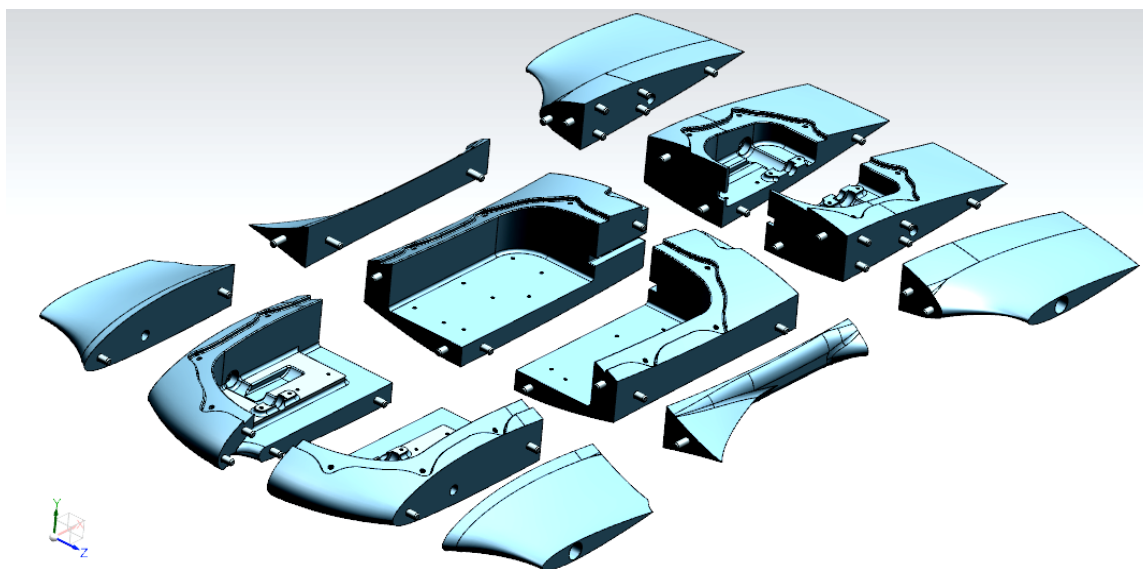


Рис. 8. 3D-модель деталей корпуса аппарата

На рис. 9 показан процесс печати консоли аппарата.

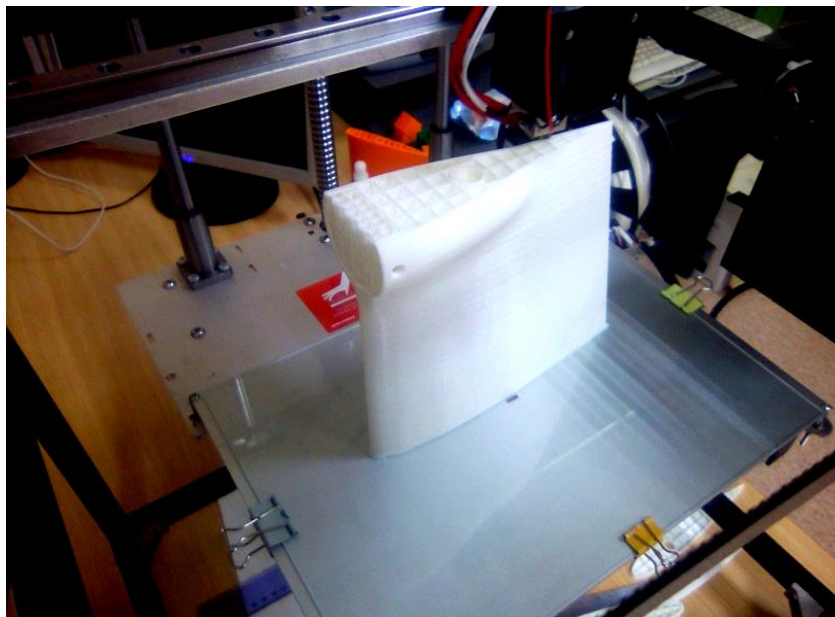


Рис. 9. Процесс печати консоли аппарата

Собранный беспилотный летательный аппарат изображён на рис. 10.



Рис. 10. Собранный двухсредный беспилотный летательный аппарат

На основе вышеизложенного сформулируем вывод о потенциальной реализуемости проекта в виде опытного изделия. Исследования аналогов позволяют судить о перспективности исследований в области создания двухсредных аппаратов. На данный момент существует множество аппаратов, сходных с разрабатываемым по области применения, но ни один из них на данный момент не выпускается серийно и ограничивается единичными экземплярами в рамках НИР. Всё это говорит о перспективности данного направления и одновременно о малой конкуренции в связи с недостаточным спросом на них.

Результаты проведённой работы на данном этапе:

1. Осуществлён подбор комплектующих к конвертоплану.
2. В подводных условиях проведены тестирование и настройка системы связи, в том числе видео.
3. Отработаны параметры погружения и подводного хода аппарата.
4. Проведены тестовые испытания и устранены ошибки.

Результаты данного этапа необходимы для дальнейшего развития проекта. Планируется участие в программе «Старт» в 2019 году.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Зинченко, О. Н. Беспилотные летательные аппараты: применение в целях аэрофотосъёмки для картографирования [Электронный ресурс] / О. Н. Зинченко // Ракурс: программные решения в области геоинформатики, цифровой фотограмметрии и дистанционного зондирования. – 2011. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/?page=681> (дата обращения: 18.04.2018).
2. Жолымбаев, А. О. Особенности гражданского применения беспилотных летательных аппаратов на примере возможностей их использования при ликвидации чрезвычайных ситуаций [Электронный ресурс] / А. О. Жолымбаев. – Режим доступа: <http://ucom.ru/doc/na.2016.01.03.023.pdf> (дата обращения: 17.04.2018).
3. Гизитдинова, М. Р. Самоходные автономные необитаемые подводные аппараты – прорыв в подводных технологиях / М. Р. Гизитдинова // Морская радиоэлектроника. Комплексы и системы. – 2005. – № 4(14).

**Плетнёв С. А., Шаломов В. И.**  
**S. A. Pletnev, V. I. Shalomov**

**ОБЗОР РАБОТ ПО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ МОЩНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИН  
НА СВЕРХКРИТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПАРА**

**THE REVIEW WORKS TO IMPROVE HIGH-POWER STEAM TURBINES  
FOR SUPERCRITICAL STEAM PARAMETERS**

**Плетнёв Семён Александрович** – студент факультета энергетики, транспорта и морских технологий Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: sema\_0104@mail.ru.

**Mr. Semen A. Pletnev** – a student, Faculty of energy, transport and marine technologies, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: sema\_0104@mail.ru.

**Шаломов Вячеслав Иванович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры тепловых энергетических установок Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: shalomov2012@yandex.ru.

**Mr. Vyacheslav I. Shalomov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Thermal power plants Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: shalomov2012@yandex.ru.

**Аннотация.** В статье представлен обзор работ по совершенствованию мощных паровых турбин на сверхкритические начальные параметры пара. Приведены разработанные конструктивные решения по основному оборудованию угольных энергоблоков на сверхвысокие начальные параметры пара. Даны описания конструктивных особенностей конденсационных турбин на суперсверхкритические начальные параметры пара и теплофикационных паровых турбин большой мощности на сверхкритические параметры с увеличенными отборами на теплофикацию.

**Summary.** The overview of works on the improvement of powerful steam turbines for supercritical initial steam parameters is presented. The developed design solutions for the main equipment of coal-fired power units at ultra-high initial steam parameters are given. The description of the design features of condensation turbines for super-supercritical initial steam parameters and high-power steam turbines of high power for supercritical parameters with increased selections for heating was made.

**Ключевые слова:** энергоблок, паровая турбина, сверхкритические начальные параметры пара, экономичность, надёжность.

**Key words:** power unit, steam turbine, supercritical initial steam parameters, efficiency, reliability.

УДК 621.311

Наиболее высокими параметрами в массовом производстве и в эксплуатации обладают турбины на сверхкритические значения 24 МПа и 540...560 °С. Важнейшей задачей является освоение новой ступени параметров: начального давления 28...32 МПа, температуры свежего пара и температуры пара промежуточного перегрева, равной 580...620 °С. Такие величины параметров принято называть суперкритическими.

Энергоблоки нового поколения предполагается устанавливать на конденсационных электростанциях (КЭС), котлы которых работают на каменных и бурых углях. Коэффициент полезного действия (КПД) энергоблоков, предназначенных для замещения оборудования, выработавшего свои парковый и индивидуальный ресурсы, должен составлять 42...46 %, а энергоблоков новых КЭС – 45...47 %.

Цели обзора: 1) выявление основных направлений по развитию и совершенствованию паровых турбин, работающих на сверхвысоких параметрах пара; 2) формирование представления об особенностях перспективных турбин мощных энергетических блоков.

В источнике [3] авторами приведены результаты расчётных исследований как термодинамической, так и экономической составляющих эффекта от повышения начальных параметров пара до сверхвысоких значений для теплофикационных энергоблоков. В качестве базового варианта была принята тепловая схема турбоустановки с паровой турбиной Т-250/300-23,5.

В исследованиях рассматривались диапазоны начального давления  $P_0 = 23,5 \dots 30$  МПа, температуры  $t_0 = 540 \dots 600$  °С и давления пара после однократного промежуточного перегрева  $P_{п.п} = 3,6 \dots 4,5$  МПа. В расчётах термодинамической эффективности оценивалась степень влияния роста параметров пара на мощность и уровень электрического КПД энергоблока с теплофикационной турбиной.

В экономической части расчётов определялись показатели коммерческой эффективности инвестиций в соответствующие проекты, объёмы общих инвестиционных и производственных издержек.

Результаты расчётов позволили оценить оптимальный уровень сверхвысоких значений начальных параметров пара для теплофикационного энергоблока с паровой турбиной Т-280/335-26,1. Наилучшие показатели коммерческой эффективности достигаются для варианта с параметрами свежего пара и в промежуточном перегревателе  $P_0 = 26,1$  МПа,  $P_{п.п} = 4,035$  МПа,  $t_0/t_{п.п} = 575/575$  °С. В этом случае получены значения КПД брутто – 42,56 %, КПД нетто – 40,96 %, номинальной мощности в конденсационном режиме эксплуатации – 334 МВт, а в теплофикационном при  $Q_T = 1381,6$  ГДж/ч (330 Гкал/ч) – 279,1 МВт. Использование более высоких параметров пара приводит к существенному росту стоимости проектов.

В статье показано, что при модернизации энергоблоков с турбинами Т-250/300-23,5 целесообразно восстановление изначальных проектных значений температур свежего пара и после промежуточного перегрева  $t_0/t_{п.п} = 565/560$  °С.

В научной работе [7] представлены итоговые данные разработки угольного энергоблока на суперкритические параметры (СКП) пара. В публикации сделан вывод о том, что можно не только достичь высоких показателей по экономичности и надёжности нового энергоблока, но и решить много проблем, связанных с эффективным сжиганием твёрдого топлива без превышения перспективных норм по ограничению выбросов вредных веществ в атмосферу. Рассмотрены технологические методы подавления оксидов азота  $NO_x$ , способные обеспечить их допустимую эмиссию. Авторами представлен обзор состояния разработок современных мощных пылеугольных энергоблоков на суперсверхкритические (ССКП) и ультрасверхкритические параметры (УСКП) пара. Увеличение КПД нетто энергоблока достигается в результате оптимизации тепловой схемы, совершенствования основного и вспомогательного оборудования и, главное, повышения параметров пара перед турбиной. Благодаря повышению КПД, сокращаются выбросы вредных веществ в атмосферу, в том числе парникового газа  $CO_2$ . На сегодняшний день в мировой энергетике уровень параметров пара за котлом составляет  $P_0 = 30$  МПа,  $t_0 = 610 \dots 620$  °С, а КПД на таких блоках достигает 47 %. Энергоблоки ССКП работают в Германии, Дании, Японии, Китае, Корее, ведутся проектные разработки в России. В настоящее время в ЕС в рамках программы ThermieAD700 прорабатываются проекты создания энергоблока на ультрасверхкритические параметры пара ( $P_0 = 35$  МПа,  $t_0/t_{п.п} = 700/720$  °С) с КПД около 50 %.

В США, Японии и Китае тоже приступили к исследованиям в этом направлении. Разработка технических решений начата и в России (Всероссийский теплотехнический институт, Московский энергетический институт). Заявленный уровень параметров пара требует применения новых материалов – сплавов на никелевой основе. Учитывая высокую стоимость никелевых сплавов, отсутствие в России технологии их производства и изготовления изделий из них для паровых установок, в качестве первого этапа освоения УСКП следует рассматривать создание энергоблоков на параметры пара  $P_0 = 32$  МПа,  $t_0/t_{п.п} = 650/650$  °С, практически не требующих дорогостоящих сплавов. Для разработки и сооружения головных энергоблоков ССКП и УСКП необходимы сов-



местные усилия правительства, энергетиков и металлургов, научных организаций и производителей оборудования.

В материалах [9] Всероссийского технологического института рассказывается о проведении комплекса исследований, в котором рассматриваются особенности поэтапного совершенствования системы регенеративного подогрева питательной воды на отечественных турбоустановках сверхкритического давления (СКД). Этапы характеризуются применением в ТУ смешивающих подогревателей низкого давления (СПНД), бездеаэрационной схемы и двухступенчатых питательных насосов. В работе рассмотрены принципиальная тепловая и пусковая бездеаэрационные схемы, обозначены их преимущества перед деаэрационной. Анализ результатов исследования показал, что увеличение КПД достигнуто благодаря повышению параметров пара до 25 МПа и 575/595 °С (примерно на 2 %), повышению температуры питательной воды до 300 °С (на 0,7 %), снижению давления в конденсаторе в результате совершенствования конструкции и поддержания его в чистоте (на 0,7 %), использованию тепла дымовых газов (на 0,6 %), совершенствованию турбины, вспомогательного оборудования и тепловой схемы (на 2,4 %). Применение двухподъёмной бездеаэрационной тепловой схемы обеспечивает дополнительное повышение экономичности энергоблока и практически исключает работу с отключёнными подогревателями высокого давления (ПВД). Безусловно, использование такой тепловой схемы целесообразно при сооружении энергоблоков с суперкритическими параметрами свежего пара. При разработке проектов модернизации или сооружения новых энергоблоков следует оптимизировать трассы и сортамент паропроводов свежего пара, системы промперегрева и отборных паропроводов турбин исходя из экономически оправданного снижения потерь давления в них.

В статье [2] опубликованы результаты расчёта режимов нормальной и ухудшенной теплоотдачи при турбулентном течении диоксида углерода в круглой трубе при сверхкритическом давлении. Проведено сравнение с опытными данными по температуре стенки, гидравлическому сопротивлению трения, полученными в условиях малого влияния термогравитации. Дано объяснение особенностей конвективного теплообмена в области сверхкритических давлений.

В трудах [4] научного объединения имени И. И. Ползунова приведено описание конструктивных особенностей конденсационных турбин на суперсверхкритические параметры пара и теплофикационных турбин большой мощности на сверх- и докритические параметры с увеличенными отборами на теплофикацию. Для обеспечения высоких показателей эффективности и надёжности турбин ССКП предлагается применение принудительного охлаждения головных высокотемпературных термонапряжённых участков роторов высокого и среднего давления, реактивного облопачивания ЦВД (цилиндр высокого давления) и, по крайней мере, первых ступеней цилиндра среднего давления (ЦСД), двустенного корпуса ЦВД с узкими фланцами горизонтальных разъёмов. При введении охлаждения температура головной части ротора понижается до 480...490 °С, что позволяет использовать для изготовления роторов сталь 25Х1М1ФА.

Авторы утверждают, что увеличенное до 7 МПа разделительное давление (давление промежуточного перегрева пара) обеспечивает повышение тепловой экономичности энергоблока и позволяет не только выполнить ЦВД с жёстким ротором и без отборов пара из проточной части, но и уменьшить размеры тракта промежуточного перегрева.

Для обеспечения высокой экономичности энергоблока турбина имеет развитую систему регенеративного подогрева питательной воды. Первый отбор осуществляется из выхлопа ЦВД, последующие 5 и 3 – из проточных частей ЦСД и ЦНД соответственно. Температура питательной воды при этом достигает 295 °С.

В качестве примера авторы приводят разработку трёхцилиндровой турбины К-660-29,4 с перспективным ЦНД, длина рабочих лопаток последней ступени которой составляет 1320 мм; КПД цилиндров такой турбины составляют 92,1, 93,8 и 89 %, а энергоблока в целом (брутто) – 46,2 % (КПД ТУ и котла 49,9 и 92,9 % соответственно, давление в конденсаторе 5 кПа). Значение удельного расхода тепла у турбины К-660-29,4 на 9 % меньше значения удельного расхода тепла у турбины К-300-23,5.

При разработках теплофикационных турбин нового поколения на параметры пара 12,8...23,5 МПа, 565...600 °С с отборами на теплофикацию, увеличенными не менее чем на 12 %, рассматривались турбины типа Т-330/400-23,5 и Т-200/250-12,8, замещающие турбины Т-250/300-23,5 и Т-180/210-12,8. Для них предлагается перенос верхнего отопительного отбора (или значительной его части) в приводную турбину питательного насоса, что обеспечивает повышение экономичности турбоустановки; размещение обоих отопительных отборов в цилиндре среднего давления (ЦСД) даёт возможность при использовании расцепной муфты отключать ЦНД при переходе на теплофикационный режим.

В других трудах на данную тематику [1] изложены основные принципы охлаждения высокотемпературных паровых турбин и конструктивные решения, заложенные при создании первой в мире охлаждаемой паровой турбины СКР-100 (Р-100-300). Паровая турбина СКР-100 (Р-100-300) с параметрами пара  $P_0=30$  МПа,  $t_0=650$  °С с противодавлением была изготовлена Харьковским турбинным заводом в 1961 году и успешно работала на Каширской ГРЭС до 1979 года, когда была выведена из эксплуатации во вполне рабочем состоянии. Для сравнения приведены некоторые данные об особенностях конструкции и результатах эксплуатации цилиндров сверхвысокого давления паровых турбин американских энергоблоков Philo 6 (изготовитель General Electric) и Eddy-stone 1 (изготовитель Westinghouse), близких по проектным начальным параметрам пара и времени ввода в эксплуатацию турбины СКР-100. Показанные в эксплуатации высокая надёжность и эффективность системы охлаждения, применённой в цилиндре сверхвысокого давления турбины энергоблока СКР-100, подтверждают правомерность и целесообразность принципов и конструктивных решений, заложенных при её создании. По мере дальнейшего повышения температур рабочего пара реализация предложенного подхода к охлаждению многоступенчатых турбин позволит ограничить применение для крупных турбинных деталей новых более дорогостоящих жаропрочных материалов, необходимых для изготовления паровых котлов, а в некоторых случаях вообще отказаться от их использования.

В научной публикации [5] автор отмечает, что чаще всего на практике придерживаются традиционных правил эксплуатации: чем выше параметры свежего и вторичного пара и чем ниже давление в конденсаторе, тем выше экономичность турбоустановки. В то же время в научно-технической литературе приводятся достаточно аргументированные доказательства того, что такой подход, особенно при пониженных нагрузках, не всегда корректен. Это относится к регулированию температуры промежуточного перегрева пара  $t_{п.п}$ . В статье автором представлены результаты натуральных испытаний по влиянию  $t_{п.п}$  на эффективность работы турбоагрегатов различной мощности (210, 250, 300 и 325 МВт) на переменных нагрузках. Показано, что снижение  $t_{п.п}$  до оптимального значения на 10...30 °С в зависимости от нагрузки и давления в конденсаторе приводит к повышению тепловой экономичности ПТУ на 1...2 %.

К следующему из рассматриваемых направлений исследований можно отнести методику математического моделирования. Так, в материалах источника [8] представлена разработка методики математического моделирования пылеугольных конденсационных энергоблоков СКП с системами серо- и азотоочистки и математическая модель их функционирования в энергосистеме. На основе проведённой схемно-параметрической оптимизации разработаны эффективные технологические схемы энергоблоков СКП 330, 500, 660, 800 МВт с системами очистки дымовых газов. Выполнены комплексные технико-экономические исследования энергоблоков СКП 330, 500, 660, 800 МВт, работающих на сибирских углях, и по их результатам автор предлагает рекомендации по выбору рациональных схем и расходно-термодинамических параметров для энергоблоков СКП, конструктивно-компоновочных параметров систем очистки дымовых газов.

В работе [6] проведён анализ объектов исследования и разработано обоснование новых, более совершенных математических моделей и методик переменных режимов работы теплофикационных турбоустановок на основе реальных энергетических характеристик турбинных отсеков и вспомогательного оборудования по результатам обобщения экспериментального материала и данных промышленных испытаний. Усовершенствованы вычислительные методы математического моделирования, а именно методики решения системы нелинейных уравнений большой раз-



мерности, проведена модернизация существующих алгоритмов и численных методов применительно к расчёту режимов работы теплофикационных турбоустановок. Произведена апробация результатов работы на ряде ТЭЦ и подтверждение эффективности этих результатов экспериментальными данными.

Таким образом, обзор опубликованных в открытой печати работ по вопросу совершенствования и развития мощных паровых турбин на сверхкритические и суперсверхкритические параметры пара показывает, что перспективные турбины должны отличаться сверхвысокими параметрами свежего пара ( $P_0 = 30 \dots 35$  МПа,  $t_0 = 600 \dots 650$  °С), одним или двумя промежуточными перегревами пара до  $t_{п.п} = t_0$  или выше, развитой схемой регенеративного подогрева основного конденсата и питательной воды, высокой тепловой экономичностью (КПД конденсационной ТУ 45...47 %).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аркадьев, Б. А. Особенности охлаждения паровых турбин на примере турбины СКР-100 на суперкритические параметры пара / Б. А. Аркадьев. – М.: Теплоэнергетика, 2015. – 42 с.
2. Валуева, Е. П. Численное исследование теплообмена и турбулентного течения диоксида углерода в трубе при сверхкритическом давлении / Е. П. Валуева, Е. Н. Кулагин. – М.: Теплоэнергетика, 2012. – 41 с.
3. Карилов, В. Ф. Экономическая эффективность использования сверхвысоких значений начальных параметров пара в теплофикационных энергоблоках / В. Ф. Карилов, Е. А. Захаренков. – М.: Теплоэнергетика, 2014. – 3 с.
4. Концепция турбин на суперсверхкритические, сверхкритические и докритические параметры пара / В. Е. Михайлов, Л. А. Хоменок, И. И. Пичугин [и др.]. – М.: Теплоэнергетика, 2017. – 12 с.
5. Тарелин, А. А. Влияние температуры промежуточного перегрева на эффективность паровых турбоустановок ТЭС, работающих на переменных режимах / А. А. Тарелин. – М.: Теплоэнергетика, 2017. – 71 с.
6. Татаринова, Н. В. Математическое моделирование теплофикационных турбоустановок для решения задач повышения энергетической эффективности работы ТЭЦ: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.04.12 / Татаринова Наталья Владимировна. – Екатеринбург, 2014. – 24 с. – Библиогр.: с. 20-24.
7. Пылеугольные энергоблоки на супер- и ultrasверхкритические параметры пара / А. Г. Тумановский, А. Л. Шварц, Е. В. Сомова [и др.]. – М.: Теплоэнергетика, 2017. – 19 с.
8. Шепель, В. С. Техничко-экономическое исследование энергоблоков с суперкритическими параметрами и установками серо- и азотоочистки: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / Шепель Виталий Сергеевич. – Новосибирск, 2013. – 22 с.
9. Технические решения по топочному устройству котла на суперкритические параметры пара / А. В. Штегман, И. А. Рыжий, Д. В. Сосин [и др.]. – М.: Теплоэнергетика, 2017. – 30 с.

**Черный С. П., Бузикаева А. В., Шевченко М. В., Тимофеев А. К.**  
**S. P. Cherny, A. V. Buzikaeva, M. V. Shevchenko, A. K. Timofeev**

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ  
НА КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОЛИНОМА В АЛГОРИТМЕ ВЫВОДА СУГЕНО ПЕРВОГО  
ПОРЯДКА**

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF PARAMETERS OF OBJECT UNDER CONTROL  
ON POLINOM RATIO IN THE OUTPUT ALGORITHM OF SUGENO OF FIRST ORDER**

**Черный Сергей Петрович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры 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.

**Mr. Sergey P. Cherny** – PHD in Engineering, associate Professor, Electric drive and automation of industrial installations Department of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: keparu@knastu.ru.

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

**Ms. Alina V. Buzikaeva** – Master's Degree student of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: keparu@knastu.ru.

**Шевченко Матвей Валерьевич** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: keparu@knastu.ru.

**Mr. Matvey V. Shevchenko** – Master's Degree student of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: keparu@knastu.ru.

**Тимофеев Антон Константинович** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: keparu@knastu.ru.

**Mr. Anton K. Timofeev** – Master's Degree student of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: keparu@knastu.ru.

**Аннотация.** В работе представлен анализ влияния параметров объекта регулирования на основные характеристики и настройки нечёткого регулятора Сугено. Основное влияние параметров объекта связано с изменением выходного многоточечного множества, при этом простота коррекции нечёткой системы будет обусловлена выбранным алгоритмом нечёткого логического вывода.

**Summary.** The paper presents an analysis of the influence of the parameters of the object under control on the main characteristics and settings of the fuzzy Sugeno controller. The main influence of the object's parameters is related to the change in the output multipoint set, while the simplicity of correcting a fuzzy system will be determined by the selected algorithm of fuzzy inference.

**Ключевые слова:** интеллектуальная система управления, нечёткий логический регулятор, вариация параметров системы управления.

**Key words:** intelligent control system, fuzzy logic controller, variation of control system parameters.

УДК 681.5.01:658.5

## Введение

Анализ задач современной теории управления позволяет выделить проблему, заключающуюся в необходимости построения такой математической модели, которая позволяла бы учитывать неполноту и неточность исходных данных, а также существенные недостатки математического описания самого объекта регулирования. Такая методика позволит расширить интеллектуальные и информационные возможности систем автоматического управления, реализованных с применением технологии мягких вычислений.

В работе приведён синтез и анализ нечёткого логического регулятора Сугено первого порядка при изменении внутренних параметров самой интеллектуальной системы управления – постоянной времени и коэффициента усиления тиристорного преобразователя.

Для анализа влияния основных параметров объекта регулирования на интеллектуальную систему будет использована модель электропривода постоянного тока с подчинённым регулированием, представленная на рис. 1.

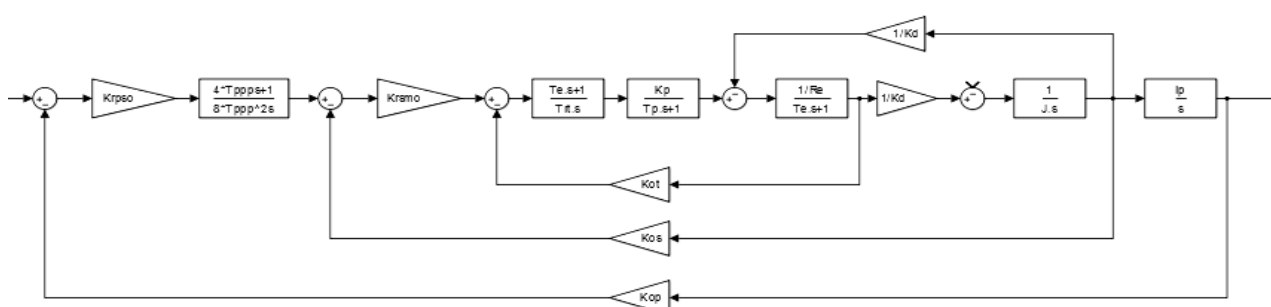


Рис. 1. Модель системы автоматического регулирования положения

Моделирование нечёткой системы автоматического управления с использованием технологии мягких вычислений выполняется на базе системы (см. рис. 2), где выполняется замена классического регулятора положения интеллектуальным.

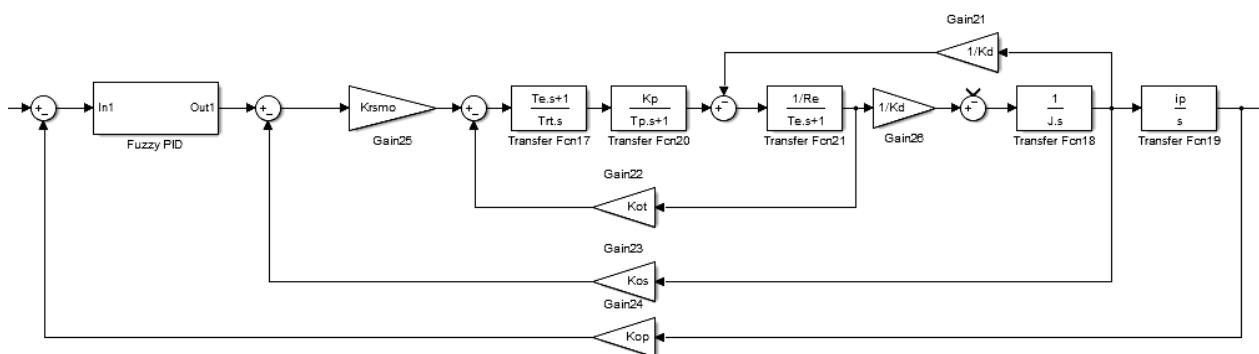


Рис. 2. Модель системы с интеллектуальным регулятором

Синтез интеллектуальной системы управления заключён в настройке блоков фазификации и дефазификации, составлении базы знаний регулятора, состоящей из набора нечётких продукционных правил. Нечёткий логический регулятор состоит из трёх лингвистических переменных на входе ( $P$ ,  $I$  и  $D$ ), которые анализируют сигнал ошибки, и одной лингвистической переменной, формализующей выходной сигнал, которая анализирует производную сигнала ошибки. Реализация интеллектуального регулятора выполняется с применением алгоритма вывода Сугено [1; 2].

Лингвистические переменные, формализующие понятия первой, второй и третьей входных величин нечёткого регулятора соответственно, реализованы с использованием пяти аппроксими-

рованных функций принадлежности треугольного вида, различающихся между собой диапазонами распределения этих величин в блоке фазсификации.

Лингвистическая переменная output 1, формализующая понятие выходной величины нечёткого регулятора, также реализуется с применением пяти многоточечных множеств [3; 4].

База знаний нечёткого логического регулятора состоит из пяти продукционных правил, которые связывают входные и выходные значения лингвистических переменных (см. рис. 3).

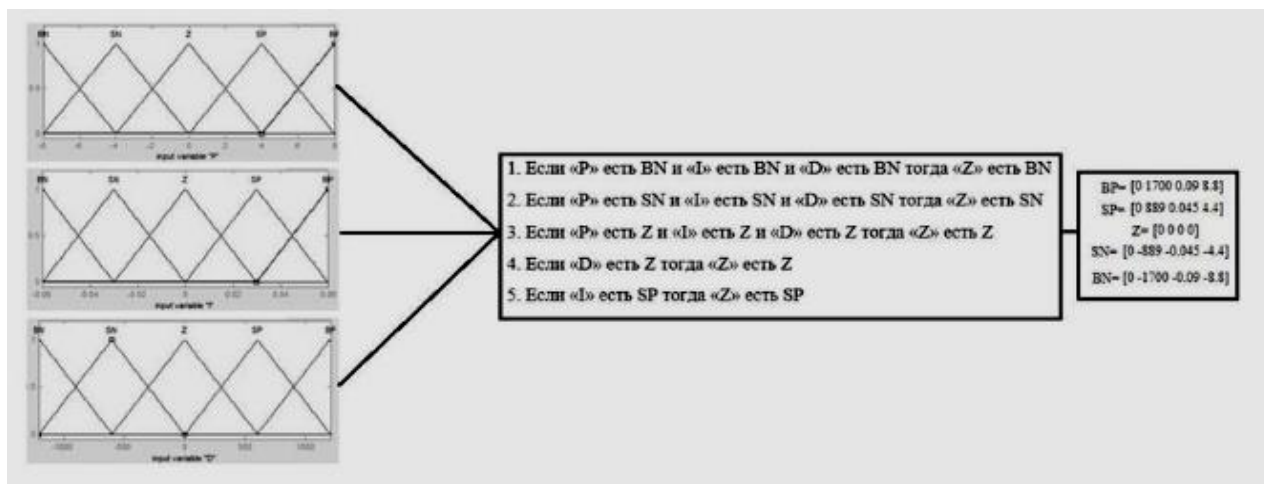


Рис. 3. База знаний нечёткого регулятора с алгоритмом вывода Сугено

В результате моделирования системы автоматического регулирования положения был получен график переходных процессов с классическим и интеллектуальным регуляторами, анализ которых определяет основные достоинства такой методики применением технологии мягких вычислений, а именно существенным снижением перерегулирования относительно классической системы управления и более высокими показателями по быстродействию (см. рис. 4).

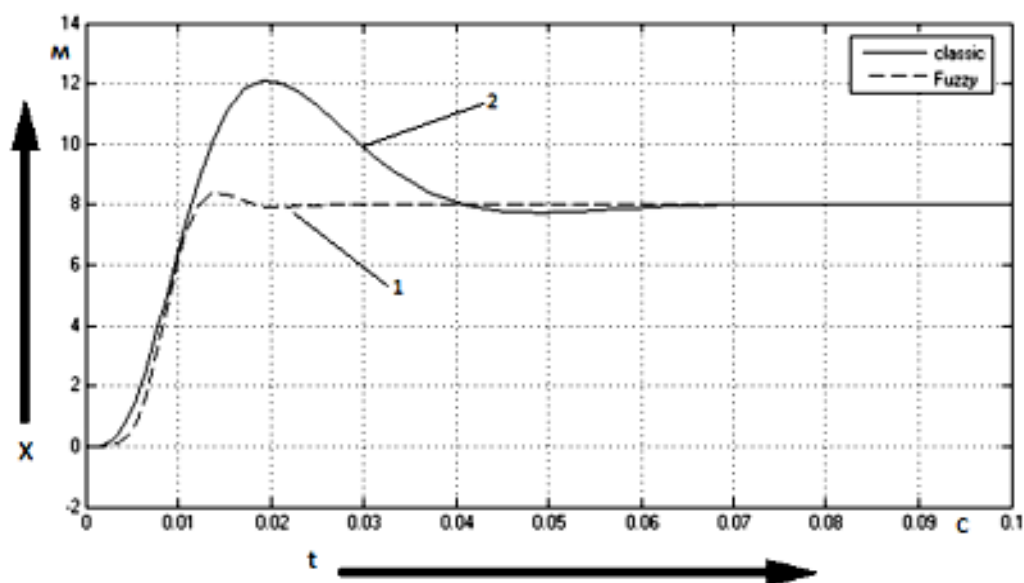


Рис. 4. График переходных процессов системы автоматического регулирования положения:  
 1 – выходной сигнал системы с НЛР; 2 – выходной сигнал классической системы

При изменении основных параметров объекта регулирования (увеличение и уменьшение коэффициента усиления тиристорного преобразователя ( $K_p$ ) на 15, 30, 45 и 60 % и постоянной времени тиристорного преобразователя ( $T_p$ ) на 25, 40 и 60 %) была выполнена модернизация системы автоматического управления (САУ). Наглядно отображает форму переходного процесса 45%-е изменение параметров объекта регулирования [5; 6].

Путём уменьшения параметров объекта регулирования на 70 % была выполнена модернизация нечёткой системы управления с алгоритмом вывода Сугено, результаты моделирования которой проиллюстрированы на рис. 5 и 6.

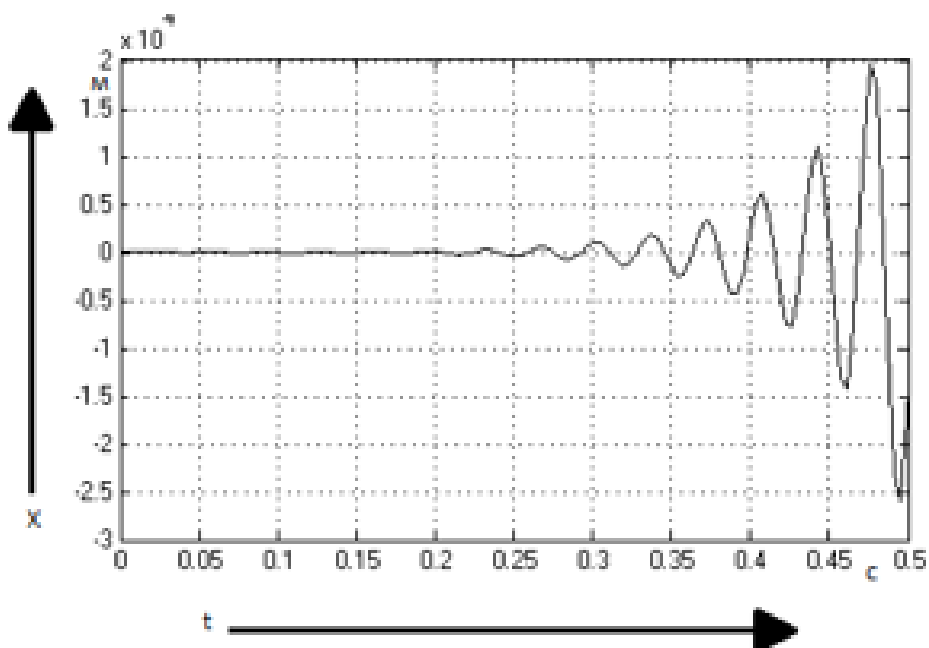


Рис. 5. Переходный процесс системы автоматического регулирования положения с линейным регулятором

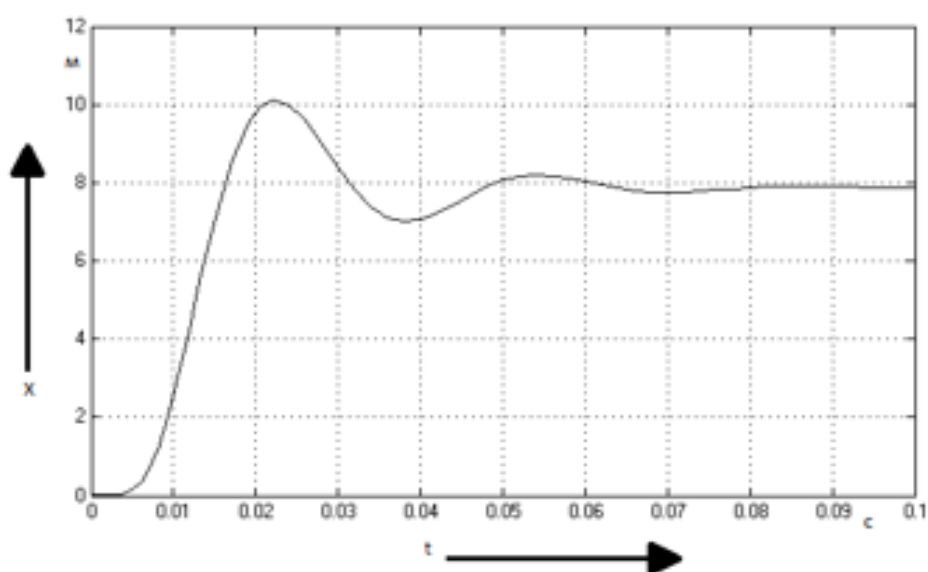


Рис. 6. Переходный процесс системы автоматического регулирования положения с нечётким регулятором

Анализ графиков переходных процессов, представленных на рис. 5 и 6, позволяет сделать вывод о том, что система автоматического регулирования положения с линейным регулятором при уменьшении коэффициента тиристорного преобразователя на 70 % от номинальных 100 % становится неустойчивой, в то время как система автоматического регулирования положения с нечетким регулятором продолжает обрабатывать входное воздействие, но с наличием незначительной статической ошибки, равной 0,5.

Рекомендации по настройке выходной лингвистической переменной приведены в табл. 1.

Таблица 1

Изменения параметров функции принадлежности  
выходной лингвистической переменной системы при изменении ( $K_p$ )

Номинальные значения	BN	SN	Z	SP	BP
$K_p=27,5$ 100 %	[0 -1700 -0,09 -8,8]	[0 -851,4 -0,045 -4,4]	[0 0 0 0]	[0 851,4 0,045 4,4]	[0 1700 0,09 8,8]
$K_p=31,62$ 115 %	[0 -1710 -0,09 -8,8]	[0 -852 -0,0419 -4,4]	[0 0 0 0]	[0 852 0,0419 4,4]	[0 1700 0,09 8,8]
$K_p=35,75$ 130 %	[0 -1710 -0,09 -8,8]	[0 -805,5 -0,039 -4,4]	[0 0 0 0]	[0 805,5 0,039 4,4]	[0 1710 0,09 8,8]
$K_p=39,87$ 145 %	[0 -1710 -0,09 -8,8]	[0 -851,4 -0,045 -4,4]	[0 0 0 0]	[0 851,4 0,045 4,4]	[0 1710 0,09 8,8]
$K_p=20,62$ 75 %	[0 -1310 -0,09 -8,8]	[0 -663,5 -0,045 -4,4]	[0 0 0 0]	[0 663,5 0,045 4,4]	[0 1310 0,09 8,8]
$K_p=16,5$ 60 %	[0 -1210 -0,09 -8,8]	[0 -608,1 -0,045 -4,415]	[0 0 0 0]	[0 608,1 0,045 4,415]	[0 1210 0,09 8,8]
$K_p=12,37$ 30 %	[0 -1110 -0,09 -8,8]	[0 -595,9 -0,045 -4,415]	[0 0 0 0]	[0 595,9 0,045 4,415]	[0 1110 0,09 8,8]

Изменения параметров функции принадлежности выходной лингвистической переменной системы при изменении ( $T_p$ ) показаны в табл. 2.

Таблица 2

Изменения параметров функции принадлежности  
выходной лингвистической переменной системы при изменении ( $T_p$ )

Номинальные значения	BN	SN	Z	SP	BP
$T_p=0,001$ 100 %	[0 -1700 -0,09 -8,8]	[0 -851,5 -0,0456 -4,4]	[0 0 0 0]	[0 851,5 0,0456 4,4]	[0 1700 0,09 8,8]
$T_p=0,00125$ 125 %	[0 -1710 -0,09 -8,8]	[0 -663,8 -0,0455 -4,4]	[0 0 0 0]	[0 663,8 0,0455 4,4]	[0 1710 0,09 8,8]
$T_p=0,00140$ 140 %	[0 -1710 -0,09 -8,8]	[0 -660,1 -0,0453 -4,415]	[0 0 0 0]	[0 660,1 0,0453 4,415]	[0 1710 0,09 8,8]
$T_p=0,00075$ 75 %	[0 -1690 -0,09 -8,8]	[0 -860 -0,04429 -4,4]	[0 0 0 0]	[0 860 0,04429 4,4]	[0 1690 0,09 8,8]
$T_p=0,00060$ 60 %	[0 -1624 -0,09 -8,8]	[0 -815 -0,04429 -4,4]	[0 0 0 0]	[0 815 0,04429 4,4]	[0 1624 0,09 8,8]
$T_p=0,00045$ 45 %	[0 -1620 -0,09 -8,8]	[0 -812 -0,04428 -4,4]	[0 0 0 0]	[0 812 0,04428 4,4]	[0 1620 0,09 8,8]

Результаты моделирования интеллектуальной системы с совместным регулированием контуров положения наглядно показывают качество реализации основных параметров. В данном случае качество динамических характеристик переходного процесса зависит от поэтапного увеличения и уменьшения основных параметров системы регулирования (коэффициента усиления и постоянной времени тиристорного преобразователя) и распределения функций принадлежности в заданном диапазоне регулирования.

Приведённый анализ результатов моделирования интеллектуальной системы управления с алгоритмом нечёткого вывода Сугено первого порядка показал, что при любых внешних и внутренних воздействиях на систему, связанных либо с её нестационарностью, либо с недетерминированными изменениями внешних условий, качество регулирования остаётся на высоком уровне и система проявляет достаточные робастные свойства.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Оптимизация распределения функций принадлежности при синтезе нечёткого регулятора для систем управления тепловыми процессами / Е. П. Иванкова, В. Г. Косицын, В. А. Соловьев, С. П. Черный // Информатика и системы управления. – 2003. – № 1(5). – С. 73-82.
2. Соловьев, В. А. Многокаскадные нечёткие системы управления мобильной установкой пиролиза древесины / В. А. Соловьев, С. П. Черный, А. И. Малюкова // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2010. – № 3. – С. 45-51.

Черный С. П., Бузикаева А. В., Шевченко М. В., Тимофеев А. К.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ НА КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОЛИНОМА  
В АЛГОРИТМЕ ВЫВОДА СУГЕНО ПЕРВОГО ПОРЯДКА

3. Соловьев, В. А. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами / В. А. Соловьев, С. П. Черный. – Владивосток: «Дальнаука», 2010. – 280 с.
4. Черный, С. П. Нечёткая многокаскадная система управления электроприводом постоянного тока / С. П. Черный, А. А. Гусаров // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2011. – № II-1(6). – С. 24-30.
5. Черный, С. П. Нечёткая многокаскадная система управления электроприводом постоянного тока / С. П. Черный, Д. А. Новак // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2012. – № 4(28). – С. 56-60.
6. Cherny, S. P. Another approach to enhancement of fuzzy controller intellectual capabilities / S. P. Cherny, V. A. Solovyev // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE Xplore Conference Publications. – 2017. – P. 1-4.



Стельмашук С. В., Капустенко Д. В.  
S. V. Stelmashchuk, D. V. Kapustenko

## СОГЛАСОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ УСТРОЙСТВОМ ТРАНСПОРТИРОВКИ ЛЕНТЫ С МОДАЛЬНЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

## COORDINATED CONTROL OF TAPE TRANSPORT DEVICE WITH MODAL REGULATORS

**Стельмашук Сергей Валерьевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры 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: rukdpsv@rambler.ru.

**Mr. Sergei V. Stelmashchuk** – PhD in Engineering, Associate Professor, Department of Electric drive and automation of industrial plants, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: rukdpsv@rambler.ru.

**Капустенко Дмитрий Витальевич** – бакалавр кафедры 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: kapustenko95@mail.ru.

**Mr. Dmitriy V. Kapustenko** – bachelor's degree student, Department of Electric drive and automation of industrial plants, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: kapustenko95@mail.ru.

**Аннотация.** В статье решается задача синтеза системы управления взаимосвязанного электропривода вращения двух барабанов по транспортировке материала в виде ленты или нити. Решению этой задачи посвящено немало трудов, однако интерес представляет управление по вектору состояния электропривода как многоканального объекта, так как регулирование по состоянию предполагает высокую точность и качество управления, что должно увеличить быстродействие привода без опасности разрушения перематываемой ленты. Такая задача является вполне актуальной в масштабах производства различных изделий из бумаги, ткани, металла и т. д. В рамках статьи осуществлена попытка соединить метод синтеза системы согласованного управления, рассмотренного И. В. Мирошником в работе [2] и математический аппарат модального управления, причём условием является неприменение локальных систем управления приводами. Предполагается, что система согласованного управления с наличием модальных регуляторов обладает достаточным ресурсом для решения задачи регулирования параметров взаимосвязанного привода.

**Summary.** The article solves the problem of the synthesis of the control system of an interconnected electric rotation of two drums for the transportation of material in the form of a tape or thread. The solution of this problem is devoted to many works, but of interest is the control by the vector of the state of the electric drive as a multi-channel object, since state control implies high accuracy and quality of control, which should increase the speed of the drive without the danger of destruction of the rewind tape. Such a task is quite relevant to the scale of production of various articles made of paper, fabric, metal, etc. Within the framework of the article, an attempt was made to combine the method of synthesizing the coordinated control system considered by I. V. Miroshnik in [2] and the mathematical apparatus of modal control. Moreover, the condition is the non-use of local drive control systems. It is assumed that the system of coordinated control with the presence of modal regulators has sufficient resources to solve the problem of controlling the parameters of an interconnected drive.

**Ключевые слова:** согласованное управление, модальный регулятор, взаимосвязанный электропривод.

**Key words:** coordinated control, modal regulator, interconnected electric drive.

УДК 62-503.51

### Введение

В технологических линиях обработка ленточного материала осуществляется комплексами параллельно работающих электроприводов, взаимосвязанных посредством транспортируемого материала. Такие технологические комплексы используются в текстильной, бумагоделательной,

металлургической и химической промышленности, где в качестве транспортируемой ленты применяются продукция с высокой жёсткостью (проволока, металлическая лента и др.), хрупкий или гибкий материал (ткань, бумага, резина и др.).

Как правило, устройства транспортировки содержат барабанные механизмы  $B_1$  и  $B_2$  для намотки или размотки ленты (см. рис. 1). На промежуточной стадии транспортировки ленты располагаются вспомогательные механизмы (ВМ) для обработки (валки, демпферы, накопители и др.), ленты и натяжное устройство (НУ). Для качественной обработки ленты требуется соответствующее натяжение ленты  $P$  при транспортировке, что предъявляет требования к электроприводам барабанных механизмов по согласованию перемещения  $\Delta y_1$  и  $\Delta y_2$  или линейных скоростей  $\dot{\Delta y}_1$  и  $\dot{\Delta y}_2$  при намотке и размотке ленты.

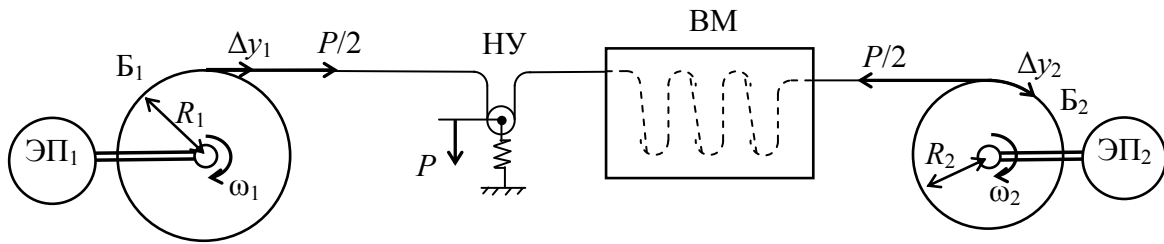


Рис. 1. Устройство транспортировки ленты

Для двухдвигательного барабанного привода характерна неидентичность сепаратных каналов, вызванная различием их инерционных нагрузок. Изменение радиуса рулонов на барабанах приводит к изменению моментов инерции приводов, что приводит к вариациям параметров объекта управления.

В задачу системы согласованного управления устройством транспортировки ленты входит поддержание заданного режима движения ленты и стабилизация требуемого натяжения или удлинения ленты.

#### Метод синтеза

Пусть имеется многоканальный объект управления с математическим описанием

$$\dot{x} = Ax + Bu; \quad y = Cx,$$

где  $A[n \times n]$ ,  $B[n \times m]$ ,  $C[m \times n]$  – системная, входная и выходная матрицы;  $x[n \times 1]$ ,  $u[m \times 1]$ ,  $y[m \times 1]$  – векторы состояния, входной вектор (или вектор управления) и выходной вектор (или вектор регулируемых переменных);  $n = mn_1$  – порядок многоканального объекта управления;  $m$  – количество каналов;  $n_1$  – порядок сепаратного объекта, то есть отдельного канала.

Синтез системы согласованного управления осуществляется на основе метода, предложенного И. В. Мирошником [2], где многоканальная система представлена как объект из двух взаимосвязанных каналов (см. рис. 2): канал относительного движения  $e = W_e(p)u_e$  и канал усреднённого движения  $\bar{x} = W_{\bar{x}}(p)\bar{u}$ .

Основным условием применимости метода Мирошника заключается в квазиоднотипности сепаратных каналов, то есть одинаковость порядков как числителей, так и знаменателей их передаточных функций. В этом случае в матричной передаточной функции многоканального объекта по диагонали порядок числителей будет равен  $n-s$ , где  $s = n_1$  при отсутствии дифференцирующих звеньев в многоканальном объекте и  $s < n_1$  – при их наличии.

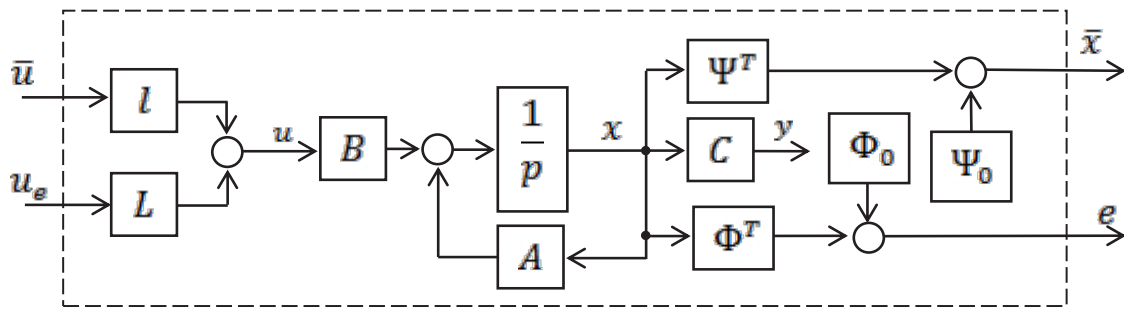


Рис. 2. Объект управления многоканальной системы

Для проверки этого необходимого условия вводится критерий системы квазиоднотипных объектов [2]: для того чтобы многоканальный объект принадлежал к классу систем квазиоднотипных объектов, необходимо и достаточно, чтобы существовало натуральное число  $s$ , такое, что

$$CA^{i-1}B = 0, \quad i = 1, \dots, s-1; \quad \det(CA^{s-1}B) \neq 0. \quad (1)$$

Канал относительного движения определяет качество согласованного управления между сепаратными каналами. Обеспечение этого качества определяется функциональными соотношениями регулируемых переменных  $y$

$$\varphi_{y_1}(y) = 0; \dots \varphi_{y_{m-1}}(y) = 0.$$

Если функциональные соотношения представляют собой линейную систему уравнений, то задаются в матричной форме  $\Phi_y^T y + \Phi_{y_0} = 0$ , где  $\Phi_y^T [(m-1) \times m]$  – матрица коэффициентов функциональных соотношений;  $\Phi_{y_0} [(m-1) \times 1]$  – вектор свободных членов функциональных соотношений.

В задаче согласованного управления рассматривается вектор относительного движения  $\epsilon = [\epsilon_1 \dots \epsilon_{m-1}]^T$ , где  $\epsilon_j = \varphi_{y_j}(y)$ , который характеризует рассогласование в работе многоканального объекта. Система согласованного управления проектируется так, чтобы сигналы рассогласования  $\epsilon_j$  стремились к нулю.

Для связывания системы согласованного управления с вектором состояния рассматривается расширенный вектор относительного движения  $e = [e_1^T \dots e_s^T]^T$ , где  $e_i = [\epsilon_1^{(i-1)} \dots \epsilon_{m-1}^{(i-1)}]^T$  –  $(i-1)$ -ая производная вектора  $\epsilon$ . В результате функциональные отношения преобразуются в систему уравнений относительного движения  $e = \Phi^T x + \Phi_0$ , где  $\Phi^T = [\Phi_1^T \dots \Phi_s^T]^T$  – расширенная матрица коэффициентов функциональных соотношений размером  $[(m-1)s \times n]$ :

$$\Phi_i^T = \Phi_y^T CA^{i-1}, \quad i = 1 \dots s; \quad (2)$$

$\Phi_0 = [\Phi_{y_0}^T \quad 0_{1 \times (m-1)(s-1)}]^T$  – расширенный вектор свободных членов функциональных соотношений размером  $[(m-1)s \times 1]$ .

Канал усреднённого движения определяет регулируемую переменную многоканального объекта, которая называется усреднённой переменной  $\bar{y}$ . Усреднённая переменная характеризует поведение согласованного многоканального объекта и определяется уравнением усреднённого движения, представляющим скалярную функцию  $\bar{y} = \psi_y(y)$  или в матричной форме

$\bar{y} = \Psi_y^T y + \psi_{y_0}$ , где  $\Psi_y^T [1 \times m]$  – вектор коэффициентов уравнения усреднённого движения;  $\psi_{y_0} [1 \times 1]$  – свободный член уравнения усреднённого движения.

Аналогично рассматривается система уравнений усреднённого движения  $\bar{x} = \Psi^T x + \psi_0$  для привязывания усреднённой переменной  $\bar{y}$  к вектору состояния многоканального объекта, где  $\bar{x} = [\bar{y} \bar{y}^{(1)} \dots \bar{y}^{(s-1)}]^T$  – вектор усреднённого движения размером  $n - (m-1)s$ ;  $\Psi^T = [\Psi_1^T \dots \Psi_{n_1}^T]^T$  – расширенная матрица коэффициентов уравнения усреднённого движения размером  $[n - (m-1)s \times n]$ :

$$\Psi_i^T = \Psi_y^T C A^{i-1}, \quad i=1 \dots s, \quad \Psi_i^T = \Phi_y^T C A^{i-1}, \quad i=(s+1) \dots n_1. \quad (3)$$

$\psi_0 = [\psi_{y_0}^T \ 0_1 \times (n - (m-1)s - 1)]^T$  – расширенный вектор свободных членов уравнения усреднённого движения размером  $[n - (m-1)s \times 1]$ .

В результате преобразования многоканального объекта в двухканальный объект с относительным и усреднённым движением осуществляется переход от вектора состояния  $x$  к вектору  $[e \ \bar{x}]^T$ . Тогда двухканальный объект будет представлен математическим описанием

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{\bar{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi^T A \Gamma_e \Phi^T A \Gamma_{\bar{x}} \\ \Psi^T A \Gamma_e \Psi^T A \Gamma_{\bar{x}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ \bar{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi^T B \\ \Psi^T B \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \Phi^T A \Gamma_0 \\ \Psi^T A \Gamma_0 \end{bmatrix},$$

где матрицы  $\Gamma_e [n \times (m-1)s]$ ,  $\Gamma_{\bar{x}} [n \times n - (m-1)s]$  и  $\Gamma_0 [n \times 1]$  отвечают за взаимосвязь между вектором состояния  $x$  и вектором  $[e \ \bar{x}]^T$

$$x = \begin{bmatrix} \Gamma_e & \Gamma_{\bar{x}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ \bar{x} \end{bmatrix} + \Gamma_0$$

и определяются из выражений

$$\begin{bmatrix} \Gamma_e & \Gamma_{\bar{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi^T \\ \Psi^T \end{bmatrix}^{-1}; \quad \Gamma_0 = - \begin{bmatrix} \Phi^T \\ \Psi^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Phi_0 \\ \Psi_0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Для преобразования вектора управляющих воздействий  $u = [u_1 \dots u_m]^T$  определяются вектор относительного управления  $u_e = [u_{e_1} \dots u_{e_{m-1}}]^T$  и усреднённое управление  $\bar{u}$ . Выражение преобразования  $u = \begin{bmatrix} L & l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_e \\ \bar{u} \end{bmatrix} = L u_e + l \bar{u}$ , где коэффициенты матрицы  $L [m \times (m-1)]$  и вектора  $l [m \times 1]$  определяются решением системы уравнений

$$\begin{bmatrix} \Phi_s^T \\ \Psi_s^T \end{bmatrix} B [L \ l] = I_m, \quad (5)$$

где  $I_m$  – единичная матрица размером  $m$ . Синтез системы согласованного управления представляет собой отдельно синтез регулятора канала относительного движения и отдельно – канала усреднённого движения, но с учётом взаимосвязи. В данной работе произведён синтез модальных регуляторов обоих каналов. Структурная схема системы согласованного управления представлена на рис. 3. Синтез модальных регуляторов произведён в соответствии с методами, приведёнными в работе [1].

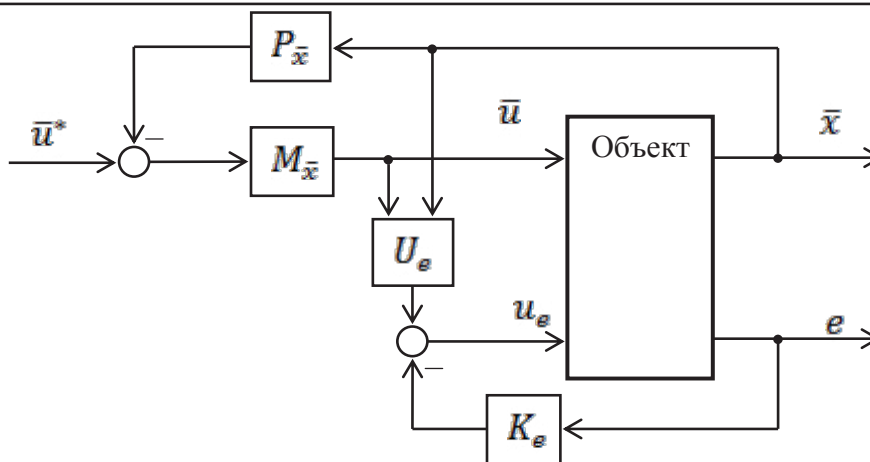


Рис. 3. Структурная схема системы согласованного управления

Канал относительного движения  $W_e$  в матричной форме представляется в следующем виде:

$$\dot{e} = A_e e + B_e [(\Phi_s^T B L)^{-1} \Phi_s^T (A \Gamma_{\bar{x}} \bar{x} + A \Gamma_0 + B \bar{u})] + u_e,$$

где системная матрица  $A_e [(m-1)s \times (m-1)s]$  и входная матрица  $B_e [(m-1)s \times (m-1)]$  канала относительного движения определяются по формулам

$$A_e = \Phi^T A \Gamma_e; \quad B_e = \Phi^T B L. \quad (6)$$

Влияние канала усреднённого движения описывается вектором-функцией, заключённой в квадратные скобки, и называется внутренним возмущением [2]. Модальный регулятор относительного движения  $K_e [(m-1) \times (m-1)s]$  имеет вид  $u_e = U_e(\bar{x}, \bar{u}) - K_e e$ , где  $U_e(\bar{x}, \bar{u})$  – вектор-функция размером  $[m-1 \times 1]$ , реализующая комбинированный алгоритм относительного управления, который обеспечивает полную компенсацию внутреннего возмущения:

$$U_e(\bar{x}, \bar{u}) = -(\Phi_s^T B L)^{-1} \Phi_s^T (A \Gamma_{\bar{x}} \bar{x} + A \Gamma_0 + B \bar{u}). \quad (7)$$

Подставляя комбинированный алгоритм  $u_e$  в выражение математического описания канала относительного движения, получим автономное уравнение относительного движения  $\dot{e} = (A_e - B_e K_e) e$ .

Наличие автономности позволяет обеспечить только полюса требуемой настройки. Тогда коэффициенты модального регулятора относительного движения при настройке, например, на биномиальную форму, определяются исходя из равенства [1]

$$\det(p I_{(m-1)s} - (A_e - B_e K_e)) = (p + \omega_{0e})^{(m-1)s}, \quad (8)$$

где  $I_{(m-1)s}$  – единичная матрица размером  $(m-1)s$ ;  $\omega_{0e}$  – заданный среднегеометрический корень, определяющий быстродействие канала относительного движения.

Канал усреднённого движения  $W_{\bar{x}}$  в матричной форме представляется в следующем виде:

$$\dot{\bar{x}} = A_{\bar{x}} \bar{x} + B_{\bar{x}} (\bar{U}_0 + \bar{u}),$$

где  $\bar{U}_0$  – скаляр, который определяется свободными членами функциональных соотношений  $\Phi_{y_0}$  и уравнения усреднённого движения  $\psi_{y_0}$  и рассматривается как внешнее возмущение:

$$\bar{U}_0 = (\psi_{n_1}^T B I)^{-1} \psi_{n_1}^T A \Gamma_0. \quad (9)$$

Системная матрица  $A_{\bar{x}} [n - (m - 1)s \times n - (m - 1)s]$  и входная матрица  $B_{\bar{x}} [n - (m - 1)s \times 1]$  канала усреднённого движения определяются по формулам

$$A_{\bar{x}} = \psi^T E A \Gamma_{\bar{x}}; B_{\bar{x}} = \psi^T E B I, \quad (10)$$

где  $E = I_n - B L (\Phi_s^T B L)^{-1} \Phi_s^T$  – квадратная матрица размером  $n$ ;  $I_n$  – единичная матрица размера  $n$ .

Для расчёта модального регулятора усреднённого движения сначала вычисляются коэффициенты вектора  $K_{\bar{x}} [1 \times n - (m - 1)s]$  по аналогии с матрицей  $K_e$ :

$$\det(p I_{n-(m-1)s} - (A_{\bar{x}} - B_{\bar{x}} K_{\bar{x}})) = (p + \omega_{0\bar{x}})^{n-(m-1)s}, \quad (11)$$

где  $\omega_{0\bar{x}}$  – заданный среднегеометрический корень, определяющий быстродействие канала усреднённого движения;  $I_{n-(m-1)s}$  – единичная матрица размером  $n - (m - 1)s$ .

Регулятор  $K_{\bar{x}}$  обеспечивает заданные полюса требуемой настройки. Но для канала усреднённого движения требуется также обеспечение заданных нулей требуемой настройки. Для этого в соответствии с положениями работы [1] необходимо определить требуемый скалярный коэффициент разомкнутого контура регулирования усреднённого движения  $M_{\bar{x}}$ , который для биномиальной формы будет равен

$$M_{\bar{x}} = \frac{\omega_{0\bar{x}}^{n-(m-1)s}}{N_{\bar{x}}}, \quad (12)$$

где  $N_{\bar{x}} = \text{Adj}(C_{\bar{x}} (p I_{n-(m-1)s} - (A_{\bar{x}} - B_{\bar{x}} K_{\bar{x}})) B_{\bar{x}})$  – полином числителя замкнутого контура регулирования усреднённого движения без коэффициента  $M_{\bar{x}}$ ;  $C_{\bar{x}} = [1 \ 0_{1 \times (n-(m-1)s-1)}]$  – выходной вектор канала усреднённого движения.

После введения коэффициента  $M_{\bar{x}}$  в контур регулирования усреднённого движения (см. рис. 3) в обратной связи контура необходимо заменить регулятор  $K_{\bar{x}}$  регулятором [1]

$$P_{\bar{x}} = M_{\bar{x}}^{-1} K_{\bar{x}} \quad (13)$$

### Математическое описание двухдвигательного барабанного привода

Динамика двухдвигательного барабанного привода ЭП<sub>1</sub> и ЭП<sub>2</sub> как объекта управления будем описывать в общем виде, характерном как для двигателей постоянного тока, так и для асинхронных двигателей в линеаризованном виде. Учитывая малую электромагнитную инерционность привода по сравнению с механической инерционностью механизмов барабанов, пренебрежём электромагнитной постоянной времени двигателей. Управление осуществляется через сигналы управления преобразователями приводов (широтно-импульсный или тиристорный преобразователь для привода постоянного тока или частотный преобразователь для привода переменного тока). Мощности приводов примем одинаковыми. Таким образом, движение барабанов описывается уравнениями

$$J_1 \dot{\omega}_1 = M_1 - M_{C1}, \quad J_2 \dot{\omega}_2 = M_2 - M_{C2},$$

где  $M_1 = \beta(k_n u_1 - \omega_1)$ ,  $M_2 = \beta(k_n u_2 - \omega_2)$  – электромагнитный момент приводов ЭП<sub>1</sub> и ЭП<sub>2</sub>;  $M_{c1} = P/2 R_1$ ,  $M_{c2} = P/2 R_2$ , – статический момент на валу приводов, вызванный силой натяжения  $P = c(\Delta y_2 - \Delta y_1)$ ;  $k_n$ ,  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $c$  – коэффициент и сигналы управления преобразователями приводов, жёсткость натяжного устройства.

Взаимосвязь между приводами барабанов объясняется наличием силой натяжения  $P$  в упругой ленте, натянутой между барабанами.

Учитывая, что линейное перемещение ленты определяется как  $\Delta \dot{y}_1 = \omega_1 R_1$  и  $\Delta \dot{y}_2 = \omega_2 R_2$ , получим математическое описание двухдвигательного привода:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & R_1 & 0 & 0 \\ -\frac{cR_1}{2J_1} & -\frac{\beta}{J_1} & \frac{cR_1}{2J_1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2 \\ \frac{cR_2}{2J_2} & 0 & -\frac{cR_2}{2J_2} & -\frac{\beta}{J_2} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{\beta k_n}{J_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{\beta k_n}{J_2} \end{bmatrix},$$

где  $x = [\Delta y_1 \ \omega_1 \ \Delta y_2 \ \omega_2]^T$  – вектор состояния;  $u = [u_1 \ u_2]^T$  – входной вектор. Здесь  $m = 2$ ,  $n_1 = 2$  и  $n = mn_1 = 4$ .

Для устройства транспортировки ленты решение задач управления движением и стабилизации натяжения ленты зависит от качества ленты. Для жёсткой ленты предъявляются требования к согласованию перемещения ленты у барабанов  $\Delta y_1$  и  $\Delta y_2$ ; для упругой ленты – линейных скоростей ленты  $\Delta \dot{y}_1$  и  $\Delta \dot{y}_2$ . В обоих случаях имеются свои особенности. Используя метод Мирошника, рассмотрим оба случая в отдельности.

### Синтез системы согласованного управления устройством перемещения жёсткой ленты

Выходной вектор определяется как вектор линейных перемещений ленты у барабанов, тогда

$$y = [\Delta y_1 \ \Delta y_2]^T; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

В соответствии с критерием квазиоднотипных объектов (1) следует, что

$$CB = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad CAB = \begin{bmatrix} \frac{R_1 \beta k_n}{J_1} & 0 \\ 0 & \frac{R_1 \beta k_n}{J_1} \end{bmatrix} \neq 0, \quad \det(CAB) \neq 0,$$

тогда  $s = 2$  и, следовательно,  $s = n_1$ , что означает отсутствие дифференцирующих звеньев в объекте управления.

Функциональное соотношение  $c(\Delta y_1 - \Delta y_2) + P_0 = 0$ , где  $P_0$  – заданное натяжение ленты, тогда  $\Phi_y^T = [c \ -c]$ ;  $\Phi_{y_0} = P_0$ .

Расширенная матрица и вектор функциональных соотношений по формулам (2) имеют вид

$$\Phi^T = \begin{bmatrix} c & 0 & -c & 0 \\ 0 & R_1 c & 0 & -R_2 c \end{bmatrix}; \quad \Phi_0 = \begin{bmatrix} P_0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Определим усреднённое движение как перемещение ленты у первого барабана  $\bar{y} = \Delta y_1$ . Тогда матрицы уравнения усреднённого движения будут иметь вид  $\Psi_y^T = [1 \ 0]$ ;  $\Psi_{y_0} = 0$ .

Расширенная матрица и вектор уравнения усреднённого движения по формулам (3) имеют вид

$$\Psi^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \Psi_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Применяя выражения (4), определим матрицы  $\Gamma_e$ ,  $\Gamma_{\bar{x}}$  и  $\Gamma_0$ :

$$\Gamma_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{1}{c} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2 c} \end{bmatrix}, \quad \Gamma_{\bar{x}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_1} \\ 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_2} \end{bmatrix}, \quad \Gamma_0 = \begin{bmatrix} -P_0 c \\ 0 \\ -P_0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Решая систему уравнений (5)  $\begin{bmatrix} 0 & R_1 c & 0 & -R_2 c \\ 0 & R_1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{\beta k_n}{J_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{\beta k_n}{J_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 & l_1 \\ L_2 & l_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ , получим

значения коэффициентов матрицы  $L$  и вектора  $l$ :

$$L_1 = 0; \quad L_2 = -\frac{J_2}{R_2 \beta c k_n}; \quad l_1 = \frac{J_1}{R_1 \beta k_n}; \quad l_2 = \frac{J_2}{R_2 \beta k_n}.$$

Математическое описание канала относительного движения по формулам (6)

$$A_e = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{c}{2} \left( \frac{R_1^2}{J_1} + \frac{R_2^2}{J_2} \right) & -\frac{\beta}{J_2} \end{bmatrix}; \quad B_e = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Вектор-функция  $U_e$  в соответствии с выражением (7) не зависит от задающего воздействия  $\bar{u}$  и определяется следующим выражением:

$$U_e(\bar{x}) = k_{e\bar{x}} \bar{x} + k_{e0} P_0, \quad k_{e\bar{x}} = \begin{bmatrix} 0 & \beta c \left( \frac{1}{J_1} - \frac{1}{J_2} \right) \end{bmatrix}, \quad k_{e0} = \frac{c^2 (1-c) (J_2 R_1^2 + J_1 R_2^2)}{2 J_1 J_2}.$$

Здесь величина  $P_0$  определяется как сигнал, задающий требуемое натяжение ленты.

Расчёт модального регулятора относительного движения  $K_e = [k_{e1} \ k_{e2}]$  осуществляется в соответствии с выражением (8):

$$p^2 + \left(k_{e1} + \frac{\beta}{J_2}\right)p + k_{e1} + \frac{c}{2} \left(\frac{R_1^2}{J_1} + \frac{R_2^2}{J_2}\right) = p^2 + 2\omega_{0e}p + \omega_{0e}^2, \quad k_{e1} = \omega_{0e}^2 - \frac{c}{2} \left(\frac{R_1^2}{J_1} + \frac{R_2^2}{J_2}\right), \quad k_{e2} = 2\omega_{0e} - \frac{\beta}{J_2}.$$

Математическое описание канала усреднённого движения (10) выглядит так:

$$A_{\bar{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{\beta}{J_1} \end{bmatrix}; \quad B_{\bar{x}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Внешнее возмущение канала усреднённого движения определится по формуле (9)

$$\bar{U}_0 = k_{\bar{x}0}P_0, \quad k_{\bar{x}0} = \frac{c(1-c)R_1^2}{2J_1}.$$

Для расчёта модального регулятора усреднённого движения сначала вычисляется  $K_{\bar{x}} = [k_{\bar{x}1} \quad k_{\bar{x}2}]$  в соответствии с выражением (11)

$$p^2 + \left(k_{\bar{x}2} + \frac{\beta}{J_1}\right)p + k_{\bar{x}1} = p^2 + 2\omega_{0\bar{x}}p + \omega_{0\bar{x}}^2,$$

$$k_{\bar{x}1} = \omega_{0\bar{x}}^2, \quad k_{\bar{x}2} = 2\omega_{0\bar{x}} - \frac{\beta}{J_1}.$$

Затем вычисляется коэффициент  $M_{\bar{x}}$ . Для этого определим числитель контура регулирования усреднённого движения:  $C_{\bar{x}} \left( \begin{bmatrix} p & 0 \\ 0 & p \end{bmatrix} - (A_{\bar{x}} - B_{\bar{x}}K_{\bar{x}}) \right)^{-1} B_{\bar{x}} = \frac{1}{p^2 + 2\omega_{0\bar{x}}p + \omega_{0\bar{x}}^2}$ , где  $C_{\bar{x}} = [1 \quad 0]$ .

Очевидно, что  $N_{\bar{x}} = 1$ , тогда по формуле (12) коэффициент разомкнутого контура регулирования усреднённого движения  $M_{\bar{x}} = \omega_{0\bar{x}}^2$ .

При расположении коэффициента  $M_{\bar{x}}$  в контур модальный регулятор в цепи обратной связи контура по формуле (13) имеет вид  $P_{\bar{x}} = \left[ 1 \quad \frac{2}{\omega_{0\bar{x}}} - \frac{\beta}{J_1\omega_{0\bar{x}}^2} \right]$ .

Регулируемым параметром контура усреднённого движения является линейное перемещение ленты разматывающего барабана  $\Delta y_1$ , который также является регулируемым параметром всей системы согласованного управления. Линейное перемещение ленты наматывающего барабана  $\Delta y_2$  регулируется за счёт работы контура относительного движения, который минимизирует рассогласование между линейными перемещениями ленты обоих барабанов, то есть  $\epsilon_1 = \Delta y_1 - \Delta y_2 \rightarrow \min$ . Получается, что мы задаём закон управления для разматывающего барабана (ведущий привод), а работа наматывающего барабана (ведомый привод) согласуется с работой разматывающего барабана, стремясь уменьшить величину  $\epsilon_1$ .

Ступенчатое воздействие на входе контура усреднённого движения задаёт длину ленты, которую необходимо переместить. Для того чтобы регулировать скорость перемещения, необходимо на входе контура усреднённого движения использовать интегрирующее звено. В результате образуется система согласованного управления двухдвигательным приводом с задающими воздействиями по скорости перемещения ленты  $\dot{y}^*$  и по силе натяжения ленты  $P_0$ .

Модель системы согласованного управления устройства перемещения жёсткой ленты, набранная в среде Simulink, представлена на рис. 4. Моделирование осуществлялось при различных соотношениях параметров быстродействия  $\omega_{0\bar{x}}$  и  $\omega_{0e}$ . Рекомендуемым соотношением является небольшое превышение быстродействия контура относительного движения по сравнению с быстродействием контура усреднённого движения  $\omega_{0e} = (2 \div 4)\omega_{0\bar{x}}$ .

За счёт повышенного быстродействия контура относительного движения натяжение ленты осуществляется раньше, чем закончатся переходные процессы привода. При более высоком относительном быстродействии возникают резкие всплески в линейной скорости ведомого привода, что ухудшает качество управления. Результаты моделирования представлены на рис. 5.

**Синтез системы согласованного управления устройством перемещения упругой ленты**  
 Выходной вектор определяется как вектор линейных скоростей ленты

$$y = [\Delta\dot{y}_1 \quad \Delta\dot{y}_2]^T; C = \begin{bmatrix} 0 & R_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_2 \end{bmatrix}.$$

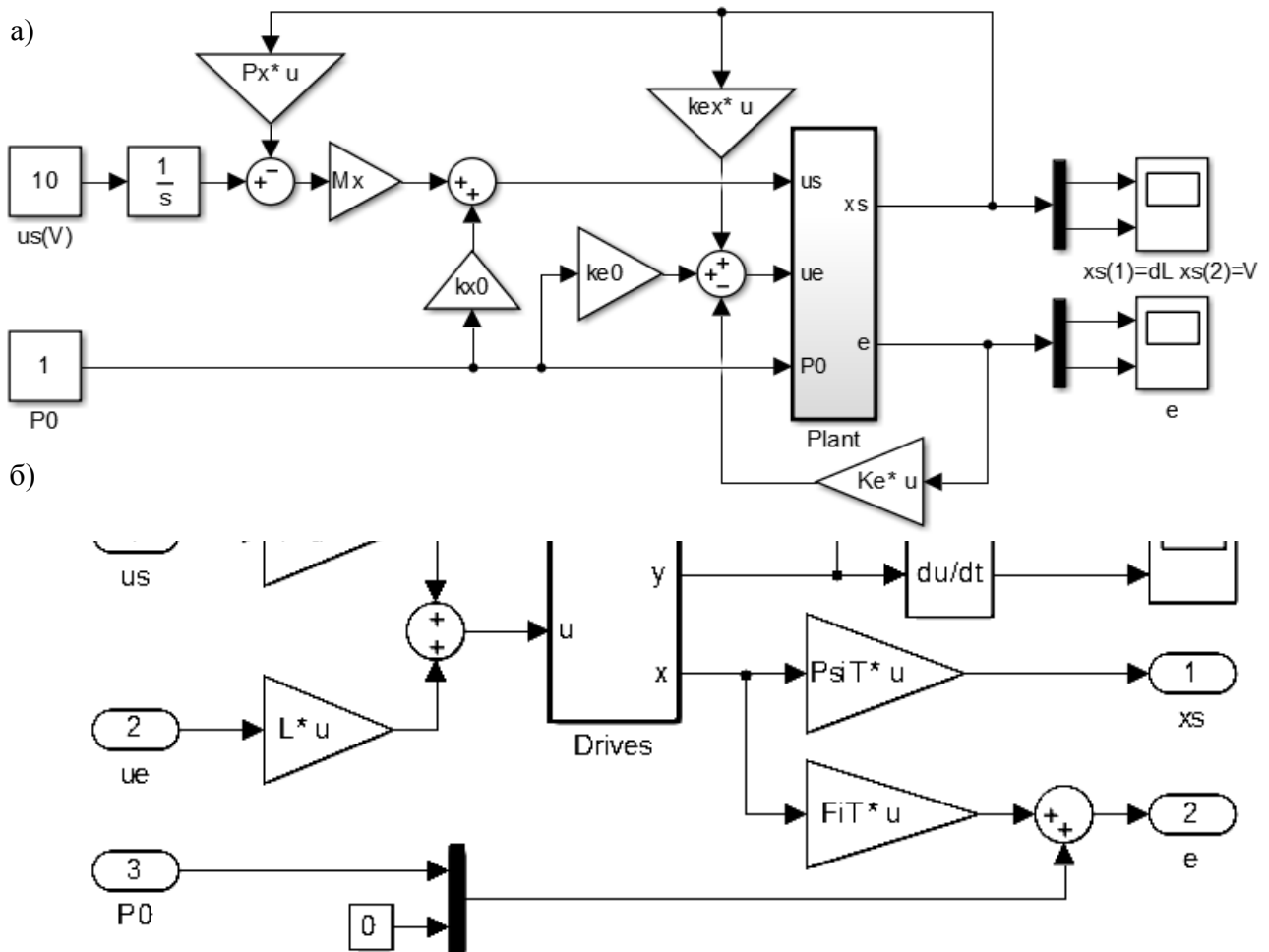


Рис. 4. Математическая модель устройства перемещения жёсткой ленты:  
 а – системы согласованного управления; б – объекта управления

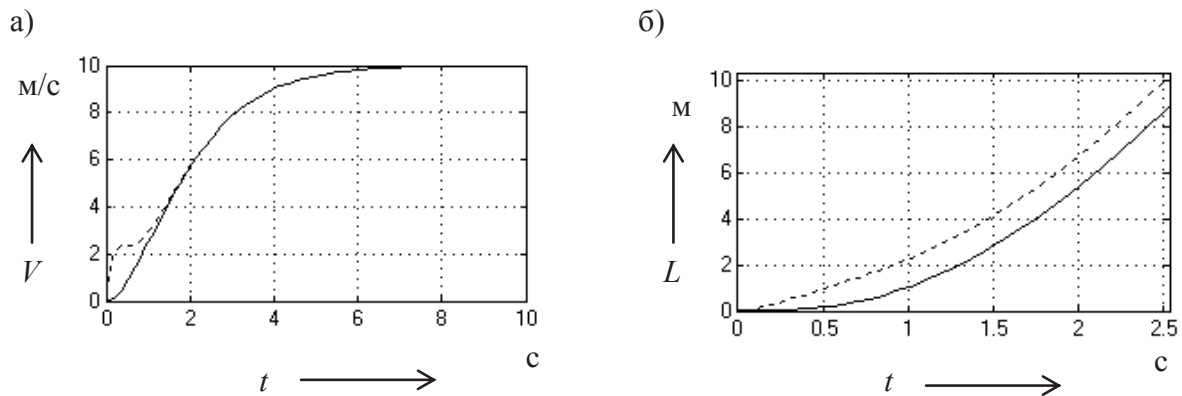


Рис. 5. Результаты моделирования устройства перемещения жёсткой ленты (сплошная линия – кривые ведущего привода, пунктирная линия – кривые ведомого привода): а – линейная скорость ленты; б – линейное перемещение ленты

Проверка критерия квазиоднотипных объектов (1):

$$CB = \begin{bmatrix} \frac{R_1 \beta k_n}{J_1} & 0 \\ 0 & \frac{R_1 \beta k_n}{J_1} \end{bmatrix} \neq 0, \quad \det(CB) \neq 0,$$

следовательно,  $s = 1$ , то есть  $s < n_1$ . Это означает, что в объекте управления присутствуют дифференцирующие звенья. Функциональное соотношение  $\delta \Delta \dot{y}_1 - \Delta \dot{y} = 0$ ;  $\delta = 1 + \frac{\Delta L_n}{L_n}$ , где  $\Delta L_n = \frac{P_0}{c_n}$  – удлинение участка ленты длиной  $L_n$  и жёсткостью  $c_n$ . Тогда  $\Phi_y^T = [\delta - 1]$ ;  $\Phi_{y_0} = 0$ .

Расширенная матрица и вектор функциональных соотношений по формулам (2) имеют вид

$$\Phi^T = [0 \quad R_1 \delta \quad 0 \quad -R_2]; \quad \Phi_0 = 0.$$

Уравнение усреднённого движения задаётся так же, как в приводе с жёсткой лентой. Расширенная матрица и вектор уравнения усреднённого движения по формулам (3) имеют вид

$$\Psi^T = \begin{bmatrix} 0 & R_1 & 0 & 0 \\ -\frac{c}{2} \left( \frac{R_2^2}{J_2} + \frac{R_1^2 \delta}{J_1} \right) & -\frac{R_1 \delta \beta}{J_1} & \frac{c}{2} \left( \frac{R_2^2}{J_2} + \frac{R_1^2 \delta}{J_1} \right) & \frac{R_2 \beta}{J_2} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \Psi_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Последняя строка  $\Psi_3 = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$  задаётся произвольно исходя из условия  $\begin{bmatrix} \Phi^T \\ \Psi^T \end{bmatrix} \neq 0$ .

При этом следует обратить внимание, что расширенный вектор относительного движения становится скалярной величиной  $e = \epsilon$ , а вектор усреднённого движения  $\bar{x}$  имеет размер  $[3 \times 1]$ , то есть  $\bar{x} = [\bar{y} \quad \dot{\bar{y}} \quad \ddot{\bar{y}}]$ .

По формулам (4) аналогично вычисляются матрицы  $\Gamma_e$  и  $\Gamma_{\bar{x}}$ . Матрица  $\Gamma_0 = 0$ .

Решая систему уравнений (5), определим матрицу  $L$  и вектор  $l$ :

$$L_1 = 0; L_2 = -\frac{J_2}{R_2\beta k_{\Pi}}; l_1 = \frac{J_1}{R_1\beta k_{\Pi}}; l_2 = \frac{J_2\delta}{R_2\beta k_{\Pi}}.$$

Проводя аналогичные вычисления, получим следующие параметры системы согласованного управления:  $k_{e\bar{x}} = [0 \quad -1 \quad 0]$ ,  $U_e(\bar{x}) = k_{e\bar{x}}\bar{x}$ ;  $\bar{U}_0 = 0$ ;  $k_e = \omega_{0e}$ ;  $M_{\bar{x}}(p) = \frac{\omega_{0\bar{x}}^2}{p}$ ;

$$k_{\bar{x}1}(p) = 2\omega_{0\bar{x}} - \frac{\beta}{J_1R_2^2 + J_2R_1^2\delta} \left( R_2^2 + R_1^2\delta + \frac{2\delta(J_1 - J_2)}{c(\delta - 1)} \omega_{0\bar{x}}^2 \right); \quad k_{\bar{x}2} = \frac{J_2}{J_1R_2^2 + J_2R_1^2\delta} \left( R_1^2 + \frac{2J_1}{c(\delta - 1)} \omega_{0\bar{x}}^2 \right);$$

$$k_{\bar{x}3} = 0.$$

Коэффициент  $M_{\bar{x}}$  является интегрирующим звеном, при размещении которого в контур регулирования усреднённого движения возникают дополнительные дифференцирующие звенья в цепи обратной связи контура, что снижает помехозащищённость контура. Поэтому коэффициент  $M_{\bar{x}}$  располагаем вне контура, а в цепи обратной связи оставляем регулятор  $K_{\bar{x}}$ .

Модель системы согласованного управления для перемещения упругой ленты представлена на рис. 6, а результаты моделирования, с тем же требованием по быстродействию, представлены на рис. 7.

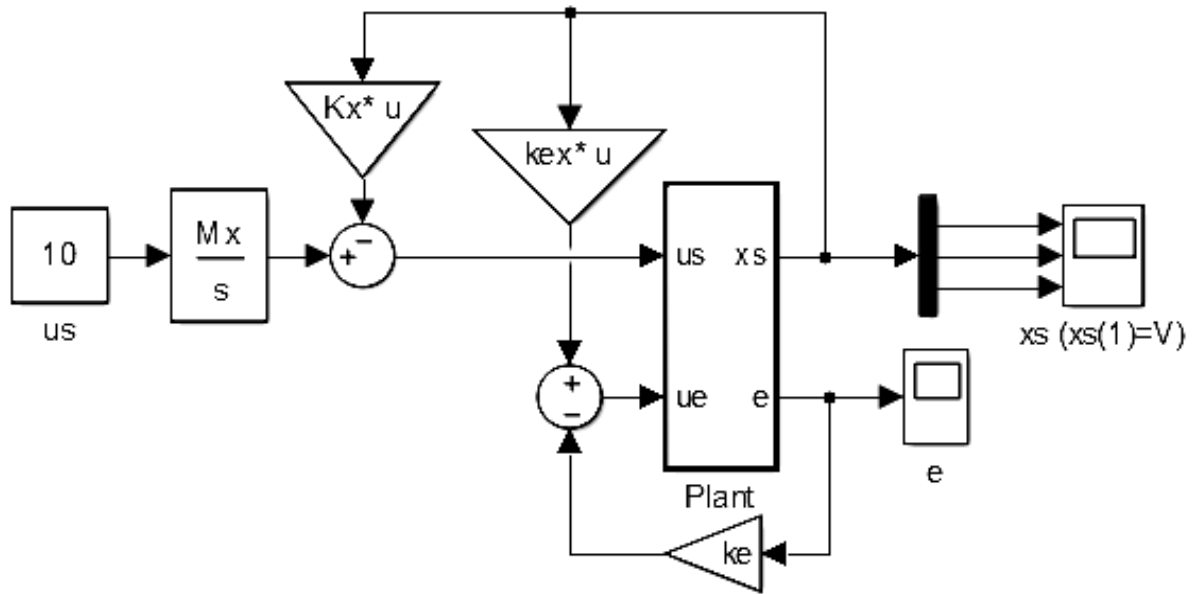


Рис. 6. Математическая модель системы согласованного управления устройством перемещения упругой ленты

Требуемое значение силы натяжения  $P_0$  задаётся неявно через параметр удлинения  $\Delta L_n$  относительно некоторого участка ленты  $L_n$  и отражается в параметре функционального соотношения  $\delta$ .

Таким образом, сила натяжения определяется не как внешнее воздействие, а параметрически, то есть через параметры системы согласованного управления.

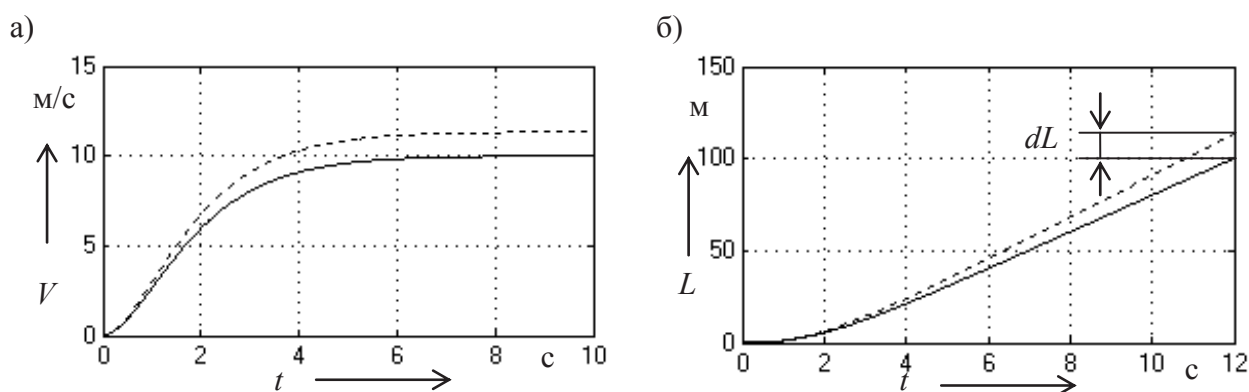


Рис. 7. Результаты моделирования устройства перемещения упругой ленты (сплошная линия – кривые ведущего привода, пунктирная – кривые ведомого привода):  
а – линейная скорость ленты; б – линейное перемещение ленты

На графиках переходных процессов видно, что поддерживается необходимое рассогласование скоростей, при которых обеспечивается требуемое удлинение ленты  $dL$ : параметр  $\delta$  определен таким образом, что при отмотке 100 м ленты удлинение составит 13,33 м.

#### Выводы

Совместное использование метода синтеза систем согласованного управления [2] и метода синтеза модальных регуляторов [1] показало удовлетворительный результат по качеству регулирования. Рассмотренный подход не требует сложных вычислений, нет необходимости использовать локальные системы управления приводами в отдельных каналах. Однако присутствуют сопутствующие проблемы, свойственные приводам барабанных механизмов, а именно задача идентификации моментов инерции приводов, которая не рассматривалась в данной статье.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузовков, Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства / Н. Т. Кузовков. – М.: Машиностроение, 1976. – 184 с.
2. Мирошник, И. В. Согласованное управление многоканальными системами / И. В. Мирошник. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1990. – 128 с.

МАШИНОСТРОЕНИЕ  
MECHANICAL ENGINEERING

**Саблин П. А., Жигалкин К. А.**  
**P. A. Sablin, K. A. Zhigalkin**

**ДИНАМИКА СИЛ РЕЗАНИЯ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ**

**DYNAMICS OF CUTTING FORCES IN HIGH SPEED MILLING**

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

**Mr. Pavel A. Sablin** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering Technology Federal State-financed Educational Institution of Higher Professional Learning Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: ikpmto@knastu.ru.

**Жигалкин Константин Александрович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: sapr@knastu.ru.

**Mr. Konstantin A. Zhigalkin** – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer-Aided Design of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: sapr@knastu.ru.

**Аннотация.** В статье рассматриваются исследования динамики технологических систем механической обработки. Они необходимы для дальнейшего развития машиностроительного производства. Обеспечение условий устойчивого движения заготовки и инструмента связано с динамикой процесса механической обработки и является одной из наиболее важных задач. Очень сложной динамикой обладает процесс высокоскоростного фрезерования, будучи наиболее нестационарным из процессов механической обработки. В статье рассматривается влияние оборотной подачи на толщину среза. Предлагается способ математического расчёта направления силы резания. Выявляются наиболее целесообразное направление резания и способы ориентации измерительных датчиков. Представляется зависимость толщины срезаемого слоя при высокоскоростном фрезеровании, и приводятся основные выводы. В заключении статьи содержатся рекомендации по ориентации измерительных датчиков для встречного и попутного фрезерования.

**Summary.** The article deals with the study of the dynamics of technological systems of machining. They are necessary for further development of machine-building production. Ensuring the conditions of stable movement of the workpiece and the tool is associated with the dynamics of the machining process and is one of the most important tasks. The high-speed milling process has a very complex dynamics, being the most unsteady of the machining processes. The article considers the influence of reverse feed on the thickness of the cut. A method of mathematical calculation of the direction of cutting force is proposed. The most expedient direction of cutting and methods of orientation of measuring sensors are revealed. The dependence of the thickness of the cut layer at high-speed milling is presented, and the main conclusions are given. In conclusion, the article contains recommendations on the orientation of the measuring sensors for oncoming and passing milling.

**Ключевые слова:** работоспособность инструмента, инструментальный материал.

**Key words:** tool performance, tool material.

УДК 621.9

Исследования динамики технологических систем механической обработки необходимы для разработки новых эффективных технологий машиностроительного производства. При проектировании, изготовлении и эксплуатации современных высокоскоростных металлорежущих станков всё чаще возникает необходимость решения задач, связанных с динамикой процесса обработки.

В первую очередь это относится к обеспечению условий устойчивого движения инструмента и заготовки [1].

Наиболее нестационарным из всех процессов механической обработки и обладающим вследствие этого наиболее сложной динамикой является процесс высокоскоростного фрезерования.

Для практического исследования динамики фрезерования достаточно часто бывает полезным знать примерное значение суммы сил  $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_k$  резания, приложенных к режущим кромкам инструмента, и направление вектора  $\vec{F}$  равнодействующей этих сил в координатах станка. Данные параметры являются основополагающими как при расчётах погрешностей размерной точности обработки вследствие упругих перемещений технологической системы, так и при построении моделей процесса фрезерования (см. рис. 1).

Кроме того, заранее известные значения направления математического ожидания  $\vec{F}$  равнодействующей сил резания и телесного угла её разброса  $\Delta\vec{F}$  позволят корректно, в соответствии с наиболее информативным пространственным направлением, расположить на станке систему датчиков для проведения экспериментальных исследований. В дальнейшем сигналы с этих датчиков с минимальной предобработкой могут быть использованы для исследования методами нелинейной динамики.

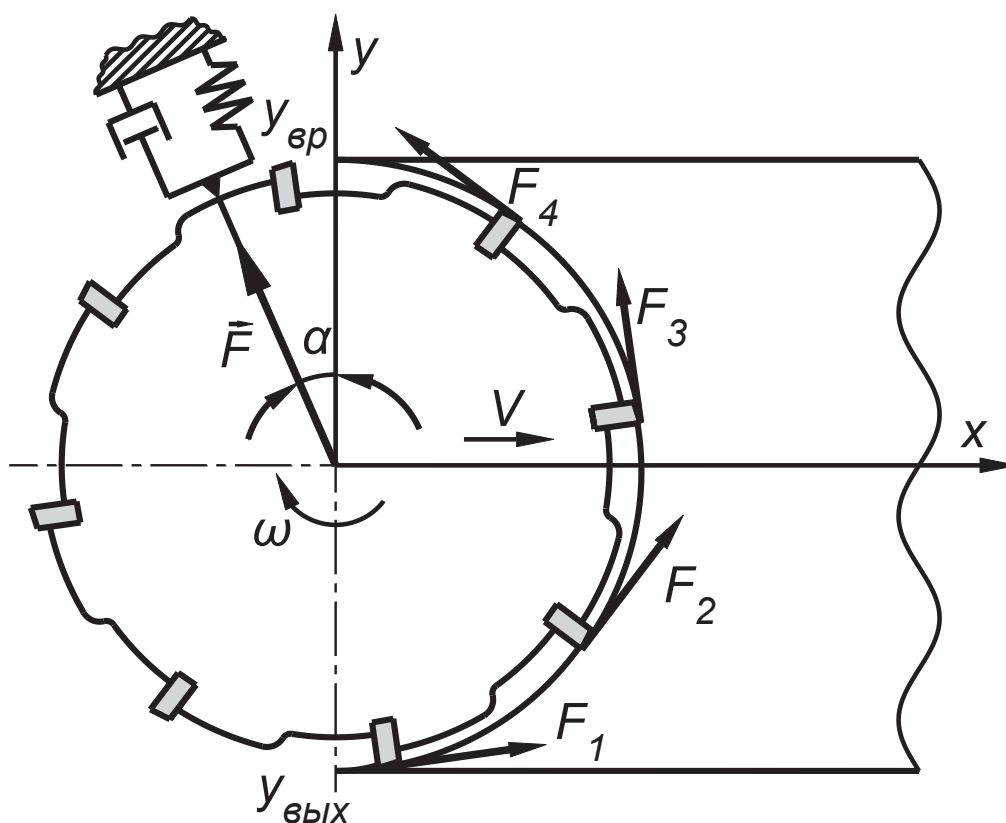


Рис. 1. Силовая схема процесса высокоскоростного фрезерования

Как известно [2], при фрезеровании траекторией относительного рабочего движения любой точки режущего лезвия является удлинённая циклоида – трохоида (см. рис. 2). Высота трохоиды равна диаметру  $D$  фрезы, а расстояние между её петлями равно величине подачи  $S_0$  на один оборот фрезы. Траектории движения лезвий отдельных зубьев сдвинуты относительно друг друга на величину подачи  $S_z$  на один зуб фрезы, равную  $S_0/z$ , где  $z$  – количество зубьев фрезы.

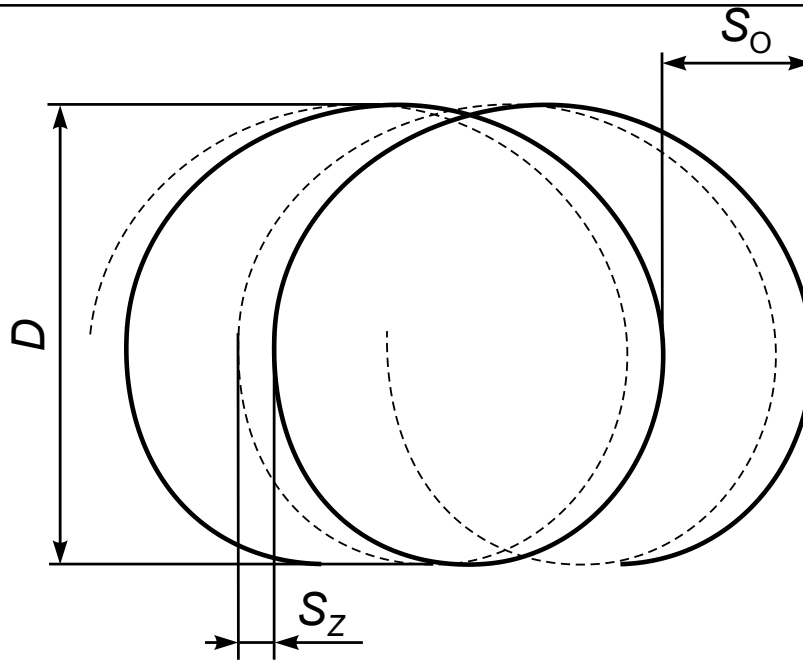


Рис. 2. Траектории рабочих движений двух смежных зубьев осевой цилиндрической фрезы (для  $z = 4$  и  $S_o = 0,32 D$ )

Для упрощения расчёта сил резания и вычисления размеров срезаемого слоя при фрезеровании трохоиду нередко заменяют окружностью. При этом предполагается [2], что ошибка от указанной замены не будет превышать 1 %. Однако в условиях высокоскоростной обработки (ВСО) даже такая незначительная погрешность может иметь существенное значение. Зачастую высокая скорость процессов пластической деформации при ВСО в совокупности с существенной нелинейностью зависимости силы резания от толщины среза и скорости резания приводит к возникновению особого типа поведения динамической системы – детерминированному хаосу, в результате чего динамическая система станка становится очень чувствительной даже к незначительным возмущениям [3; 4]. В режиме детерминированного хаоса любая погрешность, проявляющаяся вследствие какого-либо неучтённого фактора или неточности расчётов, подвергается экспоненциальному усилению, в итоге динамика реальной динамической системы сильно отличается от расчётных данных.

Таким образом, для условий высокоскоростного фрезерования следует использовать более тонкие расчёты силы резания. Для этого представим траекторию рабочего движения режущего лезвия при фрезеровании в виде кривой, описываемой точкой  $A(x, y)$ , отстоящей на фиксированном расстоянии  $R = D/2$  от центра  $O(x_0, y_0)$  круга, причём круг вращается по часовой стрелке с угловой скоростью  $\omega = V_p / (2\pi \cdot D)$ , где  $V_p$  – скорость резания, а центр круга перемещается по оси абсцисс с линейной скоростью  $v = S_o \cdot \omega / (2\pi)$ . Тогда запишем траекторию движения зуба фрезы (на рис. 3 она обозначена сплошной линией) в виде системы параметрических уравнений:

$$\begin{cases} x = x_0 + R \cdot \cos(\varphi_0 - \omega\tau) \\ y = y_0 + R \cdot \sin(\varphi_0 - \omega\tau) \\ x_0 = S_o \cdot \frac{\omega}{2\pi} \cdot \tau \\ y_0 = 0 \end{cases},$$

где  $\varphi_0 = \pi$  – начальный угол поворота фрезы;  $\tau$  – параметр времени.

Теперь рассмотрим траекторию движения предыдущего зуба фрезы (на рис. 3 она обозначена штриховой линией).

Отложим отрезок от центра  $O$  фрезы до точки  $A$  текущего положения режущего лезвия. Очевидно, что мгновенное значение толщины  $h_z$  срезаемого слоя равно расстоянию от точки  $A$  до точки  $A_1$  пересечения отрезка  $OA$  и траектории движения предыдущего зуба. Найдём координаты  $x_2$  и  $y_2$  этой точки.

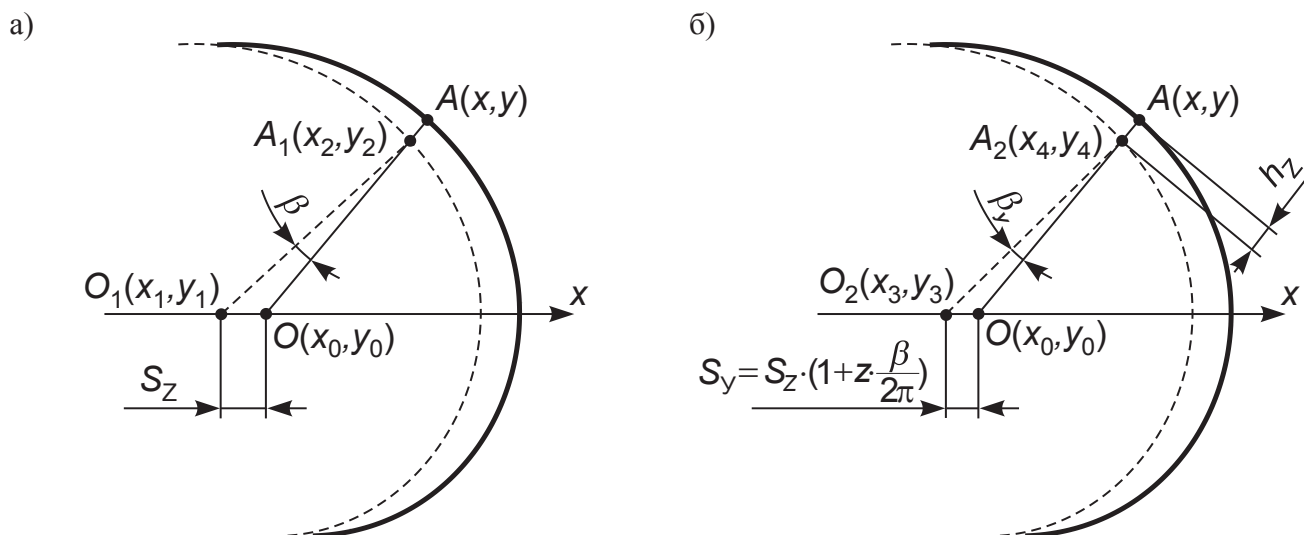


Рис. 3. Схема расчёта мгновенного значения толщины  $h_z$  срезаемого слоя:  
а – предварительный расчёт; б – уточнённый расчёт

Предположим, что центр фрезы в момент прохождения предыдущим зубом точки  $A_1$  находился в точке  $O_1(x_1, y_1)$  (см. рис. 3, а), отстоящей от текущего центра фрезы  $O$  на расстояние, равное подаче на зуб  $S_z$ , то есть

$$\begin{cases} x_1 = x_0 - S_z \\ y_1 = y \end{cases} \quad (1)$$

Теперь о точке  $A_1$  нам известно, что она принадлежит отрезку  $OA$ :

$$\begin{cases} x_2 = x_0 + t \cdot (x - x_0) \\ y_2 = y_0 + t \cdot (y - y_0) \end{cases}, \quad (2)$$

$$0 \leq t \leq 1, \quad (3)$$

где  $t$  – параметр принадлежности отрезку, а во-вторых, что она удалена от точки  $O_1$  на расстояние, равное радиусу  $R$  фрезы:

$$\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} = R. \quad (4)$$

Подставляя формулы (1) и (2) в (4), получим следующее выражение:

$$(x_0 + t \cdot (x - x_0) - (x_0 - S_z))^2 + (y_0 + t \cdot (y - y_0) - y_0)^2 = R^2,$$

которое после преобразований обращается в квадратное уравнение

$$t^2 \cdot R^2 + t \cdot (2 \cdot (x - x_0) \cdot S_z) + (S_z^2 - R^2) = 0. \quad (5)$$

Решим уравнение (5) относительно  $t$  по формуле

$$t_{1,2} = \frac{-2 \cdot (x - x_0) \cdot S_z \pm \sqrt{(2 \cdot (x - x_0) S_z)^2 - 4 \cdot R^2 \cdot (S_z^2 - R^2)}}{2 \cdot R^2},$$

что в конечном итоге приводит к появлению выражения

$$t_{1,2} = -\frac{S_z \cdot (x - x_0)}{R^2} \pm \sqrt{1 - \left(\frac{S_z \cdot (y - y_0)}{R^2}\right)^2}. \quad (6)$$

Так как по условию (3) параметр  $t$  неотрицателен, то один из корней  $t_2$  уравнения (6), являющийся суммой двух отрицательных чисел и явно приводящий к отрицательному результату,

можно отбросить, то есть получим  $t = \sqrt{1 - \left(\frac{S_z \cdot (y - y_0)}{R^2}\right)^2} - \frac{S_z \cdot (x - x_0)}{R^2}$ .

Зная параметр  $t$ , из (2) найдём точку  $A_1(x_2, y_2)$ . Однако при анализе рис. 3, *a* выявляется некоторая неточность – отрезки  $OA$  и  $O_1A_1$  расположены относительно друг друга под углом  $\beta$ . А это значит, что точкам  $A$  и  $A_1$  соответствуют разные фазы поворота зубьев фрезы и, следовательно, действительное расстояние между точками центров вращения не равно величине подачи  $S_z$  на зуб. Вычислим уточнённое расстояние между точками центров вращения фрезы:

$$S_y = S_z + \frac{\beta}{2\pi} \cdot S_o = S_z \cdot \left(1 + z \cdot \frac{\beta}{2\pi}\right).$$

Для этого воспользуемся одним из свойств векторного произведения и вычислим значение

угла  $\beta$  по формуле  $\beta = \arcsin \frac{\begin{vmatrix} (x_2 - x_0) & (y_2 - y_0) \\ (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) \end{vmatrix}}{\sqrt{(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2} \cdot \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}$ , которая после упрощения сводится к выражению

$$\beta = \arcsin \frac{S_z \cdot (y_0 - y)}{R^2} = \arcsin \frac{-S_z \cdot y}{R^2}. \quad (7)$$

Нетрудно заметить, что своего максимального абсолютного значения угол  $\beta$  достигает при условии  $|y| = R$ , когда он становится равным  $\pm \arcsin(S_z/R)$ . Таким образом, для условий фрезерования, соответствующих траекториям, отображённым на рис. 2 и 3, получим  $S_z = 0,08D = 0,16R$ ,  $\beta_{\max} = \pm 9,2^\circ$ , то есть погрешность наших вычислений может достигать величины  $\pm 9,2^\circ / 360^\circ = \pm 2,6$ .

Чтобы скомпенсировать данную погрешность, найдём уточнённую точку  $O_2(x_3, y_3)$  (см. рис. 3, *б*), в которой находился центр вращения фрезы в момент пересечения предыдущим зубом отрезка  $OA$ :

$$\begin{cases} x_3 = x_0 - S_y \\ y_3 = y \end{cases} \quad (8)$$

Тогда в соответствии с вышеописанным алгоритмом найдём уточнённую точку  $A_2(x_4, y_4)$ , которая принадлежит отрезку  $OA$

$$\begin{cases} x_4 = x_0 + t_y \cdot (x - x_0) \\ y_4 = y_0 + t_y \cdot (y - y_0) \end{cases} \quad (9)$$

$$0 \leq t_y \leq 1, \quad (10)$$

где  $t_y$  – уточнённое значение параметра и находится на расстоянии  $R$  от точки  $O_2$ :

$$\sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2} = R. \quad (11)$$

С учётом (7), (8) и (11) получим следующее выражение для  $t_y$ :

$$t_y = \sqrt{1 - \left( \frac{S_y \cdot (y - y_0)}{R^2} \right)^2} - \frac{S_y \cdot (x - x_0)}{R^2}.$$

Отсюда исходя из того, что толщина срезаемого слоя  $h_z = |A_2A|$ , где  $|A_2A|$  – длина отрезка  $A_2A$  (см. рис. 3, б), отношение длин отрезков  $|O_2A_2|/|OA| = t_y$  и значение  $|OA| = R$ , получим формулу для вычисления мгновенного значения  $h_z$ , которая с учётом (10) приобретёт вид разрывной функции

$$h_z(\tau) = \begin{cases} R \cdot (1 - t_y(\tau)) & \text{при } 0 \leq t_y(\tau) \leq 1 \\ 0 & \text{при } t_y(\tau) < 0 \text{ или } t_y(\tau) > 1 \end{cases} \quad (12)$$

Следует отметить, что для расчёта  $S_y$  мы использовали значение угла  $\beta$ , вычисленное по формуле (7). Поэтому для оценки погрешности вычислений необходимо выяснить, насколько реальное значение угла  $\beta_y$  между отрезками  $OA$  и  $O_2A_2$  в наших уточнённых расчётах отличается от значения  $\beta$ , взятого за исходное. Величину  $\beta_y$  рассчитаем по формуле, аналогичной (7), но с учётом зависимости параметров  $S_y$  и  $y$  от параметра времени  $\tau$ :  $\beta_y = \arcsin \frac{S_y(\tau) \cdot y(\tau)}{R^2}$ .

Численная проверка с помощью компьютерных расчётов показала, что расхождение между  $\beta_y$  и  $\beta$  составляет  $\pm 0,05^\circ$ , то есть погрешность вычислений равна  $\pm 0,015\%$ .

Зная значение  $h_z(\tau)$  толщины срезаемого слоя, согласно методике [5] найдём величину силы резания, приложенной к одному зубу:

$$F_z(\tau) = h_z(\tau) \cdot t_\Phi \cdot K_C, \quad (13)$$

где  $t_\Phi$  – глубина фрезерования;  $K_C$  – удельная сила резания, приходящаяся на единицу площади срезаемого слоя.

Величина  $K_C$  различна для разных обрабатываемых материалов и определяется по формуле

$$K_C = K_{C1} \cdot h_z^{-m_c}, \quad (14)$$

где  $K_{C1}$  – удельная сила резания (для конкретного обрабатываемого материала) при толщине стружки 1 мм;  $m_c$  – степенной показатель зависимости удельной силы резания от толщины стружки. Исходя из (13) и (14), получим  $F_z(\tau) = h_z(\tau)^{1-m_c} \cdot t_\phi \cdot K_{C1}$ .

Значения параметров  $K_{C1}$  и  $m_c$  для различных материалов приведены в табл. 1 [5].

Таблица 1

Значения параметров  $K_{C1}$  и  $m_c$

Материал	$K_{C1}$	$m_c$	Материал	$K_{C1}$	$m_c$
Сталь (HB125)	1500	0,25	Сплав жаропрочный	2900	0,25
Сталь (HB150)	1600	0,25	Титановый сплав	1400	0,23
Сталь легированная (HB175)	1700	0,25	Сталь калёная (HRC55)	4200	0,25
Сталь легированная (HB330)	2300	0,25	Сталь калёная (HRC63)	4250	0,25
Сталь нержавеющая (HB200)	2000	0,21	Чугун	900	0,28
Сталь нержавеющая (HB230)	2000	0,21	Алюминиевый сплав	700	0,25

Согласно предложенной методике, рассчитаем ширину срезаемого слоя и силу резания для алюминиевого сплава (см. рис. 4). Для иллюстрации используем фрезы с числом зубьев  $z$ , равным 1,8 и 300, а величину подачи  $S_z$  на зуб примем постоянной, равной 1 мм.

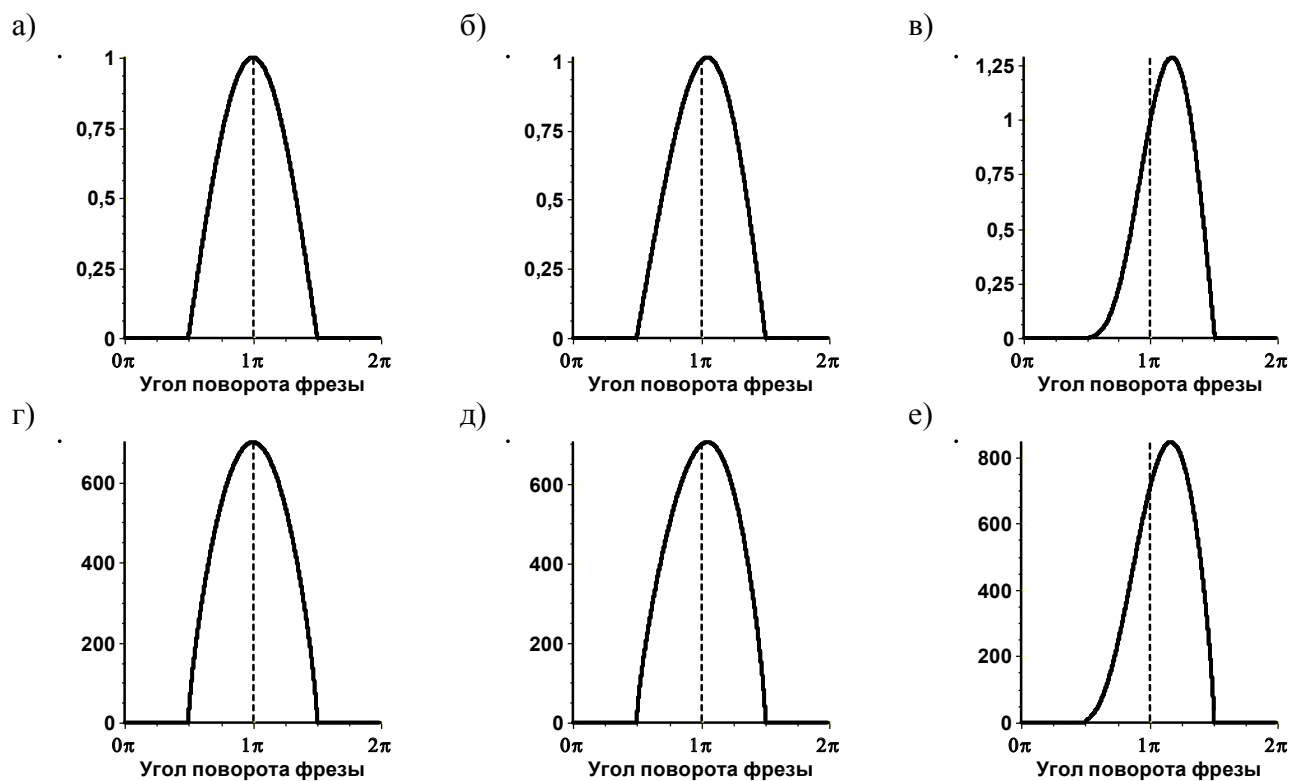


Рис. 4. Графики зависимостей ширины срезаемого слоя  $h_z$  и силы  $F_z$  резания, приложенной к одному зубу, при обработке алюминиевого сплава цилиндрической фрезой  $D = 100$  мм с различным количеством зубьев: а, г –  $z = 1$ ; б, д –  $z = 8$ ; в, е –  $z = 300$  ( $S_z = 1$  мм,  $t_\phi = 1$  мм, ширина фрезерования  $B = D$ )

На графиках хорошо видно, что чем больше оборотная подача  $S_z$  (зависит от  $z$  при  $S_z = \text{const}$ ), тем более асимметрично выглядят графики толщин  $h_z$  и, следовательно, тем сильнее реальные значения  $h_z$  отличаются от тех значений, которые мы получили бы аппроксимацией трохоидальных траекторий режущих лезвий участками окружностей.

На практике при высокоскоростном фрезеровании режимов резания полным диаметром фрезы ( $B = D$ ) стараются избегать, так как такой режим обработки сильно нагружает инструмент и катастрофически сокращает его ресурс. Для каждого высокоскоростного инструмента существуют рекомендуемые значения ширины  $B$  фрезерования при обработке различных материалов, превышение которых ведёт к изменению теплового режима и, как следствие, к усиленному износу инструмента. Так, для инструментов фирмы *Sandvik Coromant* при обработке алюминиевых сплавов рекомендуется выбирать  $B = 0,6D$ , при обработке закалённых сталей –  $B = 0,2D$  [4].

Добавим условие обработки неполным диаметром фрезы в выражение (12) в виде дополнительных разрывных зависимостей. Тогда функция мгновенного значения толщины срезаемого слоя при фрезеровании приобретёт вид

$$h_z(\tau) = \begin{cases} R \cdot (1 - t_y(\tau)) & \text{при } (0 \leq t_y(\tau) \leq 1) \wedge (y_{\text{вых}} \leq y(\tau) \leq y_{\text{вр}}) \\ 0 & \text{при } (t_y(\tau) < 0) \vee (t_y(\tau) > 1) \vee (y(\tau) > y_{\text{вр}}) \vee (y(\tau) < y_{\text{вых}}) \end{cases}$$

где  $y_{\text{вр}}$  и  $y_{\text{вых}}$  – ординаты врезания и выхода соответственно, определяемые в зависимости от способа обработки: для симметричного фрезерования (см. рис. 1)  $y_{\text{вр}} = B/2$ ,  $y_{\text{вых}} = -B/2$ ; встречного фрезерования  $y_{\text{вр}} = D/2$ ,  $y_{\text{вых}} = y_{\text{вр}} - B$ ; попутного фрезерования  $y_{\text{вых}} = -D/2$ ,  $y_{\text{вр}} = y_{\text{вых}} + B$ .

Используем полученные математические зависимости для расчёта силы резания при высокоскоростном фрезеровании. Первоначально определим, как изменяется суммарная сила  $\vec{F}$  резания всех режущих лезвий фрезы в течение одного оборота инструмента. Проведённые компьютерные расчёты (см. рис. 5) показывают, что направление математического ожидания  $\vec{F}$  силы резания сильно зависит от способа обработки. Так, при симметричном фрезеровании (см. рис. 5, а) математическое ожидание  $\vec{F}$  направлено строго в направлении оси  $Y$ , при встречном фрезеровании (см. рис. 5, б)  $\vec{F}$  составляет с осью  $Y$  положительный угол, а при попутном (см. рис. 5, в) – отрицательный.

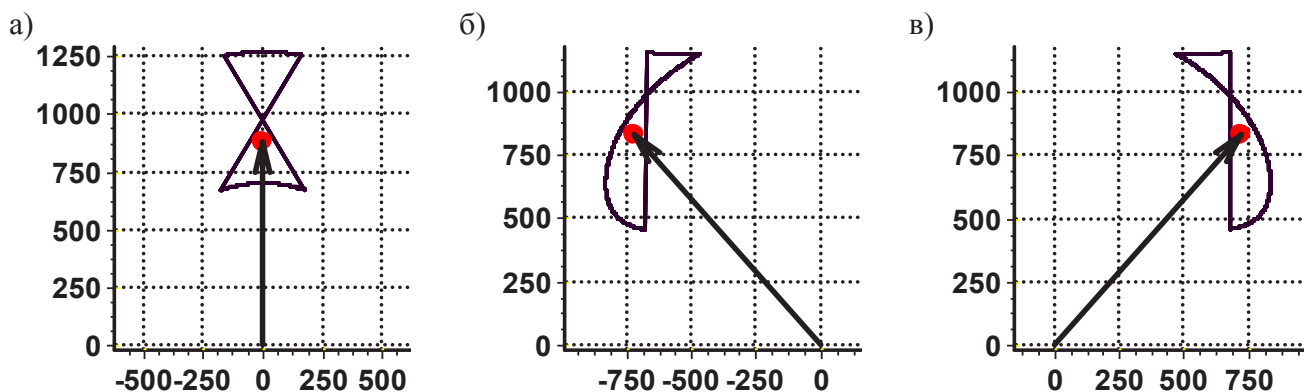


Рис. 5. Графики изменения проекций вектора  $\vec{F}$  результирующей силы резания всех зубьев цилиндрической фрезы за один её оборот: а – симметричное фрезерование; б – встречное; в – попутное. По осям абсцисс отложены проекции  $\vec{F}$  на ось  $X$  (в Ньютонах), по осям ординат – проекции на ось  $Y$  (в тех же ед.), стрелкой показано математическое ожидание  $\vec{F}$  ( $D = 100$  мм;  $z = 8$  мм;  $S_z = 1$  мм;  $B = 0,5D$ , алюминиевый сплав)

Рассмотрим, в какой степени на направление математического ожидания силы резания влияет величина ширины  $B$  фрезерования. Результаты произведённых численных расчётов представлены на рис. 6.

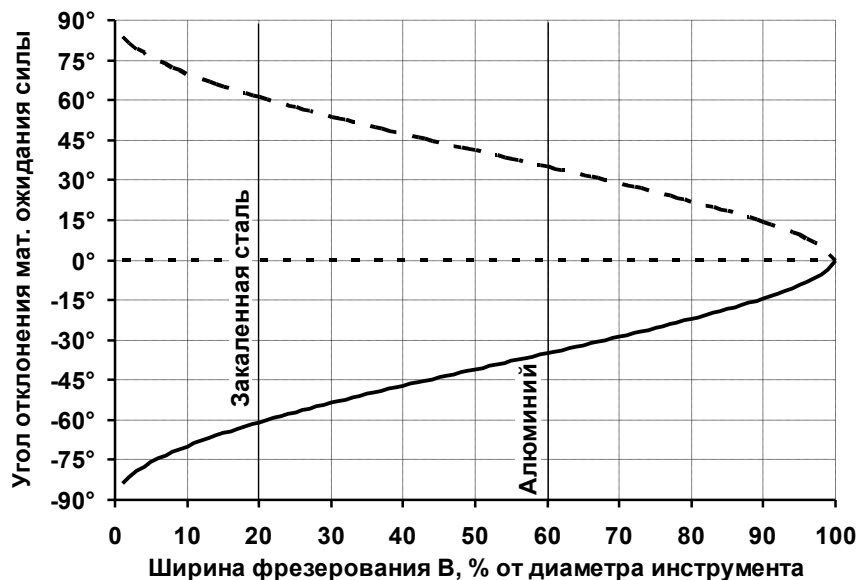


Рис. 6. Графики зависимости угла  $\alpha$  наклона (относительно оси  $Y$ ) математического ожидания  $\vec{F}$  равнодействующей силы резания от ширины  $B$  фрезерования: встречное фрезерование (сплошная линия), попутное (штриховая линия), симметричное (пунктирная линия)

В соответствии с полученными графиками можно сделать вывод о том, что для проведения экспериментальных исследований динамики сил резания при высокоскоростном фрезеровании целесообразно придерживаться симметричного направления резания, так как в этом случае математическое ожидание  $\vec{F}$  всегда будет направлено вдоль оси  $Y$  и, следовательно, систему динамометрических датчиков также следует ориентировать строго вдоль оси  $Y$ , что в технологическом плане достаточно удобно. Кроме того, при симметричном фрезеровании угол наклона  $\vec{F}$  не зависит от ширины  $B$  обработки, поэтому нет необходимости менять ориентацию системы датчиков при смене обрабатываемого материала.

При необходимости экспериментальные исследования можно проводить также для встречного и попутного фрезерования, но в этом случае систему измерительных датчиков необходимо будет ориентировать под существенным углом относительно оси  $Y$ , а именно под углом, равным  $37^\circ$ , для алюминия (рекомендованное значение  $B = 0,6D$ ) и  $61^\circ$  – для закалённых сталей (рекомендованное значение  $B = 0,2D$ ).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.
2. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – М., 1975. – 344 с.
3. Кабалдин, Ю. Г. Исследование детерминированного хаоса в динамике процессов механообработки методом реконструкции аттрактора / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Биленко, С. В. Серый // Вестник машиностроения. – 2003. – № 1. – С. 50-56.
4. Кабалдин, Ю. Г. Математическое моделирование динамической устойчивости процесса резания в виде нелинейного осциллятора с разрывными характеристиками / Ю. Г. Кабалдин, С. В. Биленко, П. А. Саблин // Вестник машиностроения. – 2006. – № 10. – С. 35-43.
5. Материалы компании Sandvik Coromant [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.coromant.sandvik.com> (дата обращения: 20.12.2017).



Горелов Д. А., Сарилов М. Ю.  
D. A. Gorelov, M. Yu. Sarilov

**РЕКОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ ИЗОМЕРИЗАЦИИ С ЦЕЛЮ  
ВОВЛЕЧЕНИЯ В ПРОЦЕСС ГЕПТАН-ОКТАНОВОЙ ФРАКЦИИ**

**RECONSTRUCTION OF CATALYTIC ISOMERIZATION INSTALLATION UNIT  
TO INVOLVE HEPTAN-OCTANE FRACTION INTO PROCESS**

**Горелов Дмитрий Александрович** – магистрант кафедры машин и аппаратов химических производств Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: gorelov.dmitrii1994@mail.ru.

**Mr. Dmitriy A. Gorelov** – Master's Degree Student, Machinery and Equipment of Chemical Industry Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: gorelov.dmitrii1994@mail.ru.

**Сарилов Михаил Юрьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов химических производств Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: sarilov@knastu.ru.

**Mr. Mikhail Yu. Sarilov** – Dr. habil. in Engineering, Head of Machinery and Equipment of Chemical Industry Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: sarilov@knastu.ru.

**Аннотация.** В данной работе изучен способ изомеризации бензиновой фракции, содержащей углеводороды C7-C8. На базе технологии изомеризации C7+ углеводородов – «Изомалк-4» – смоделирована установка изомеризации углеводородов C7+ в среде ChemCAD компании Chemstation (США). Смоделирован блок фракционирования широкой бензиновой фракции н.к.–160 °С предприятия ООО «РН-Комсомольский НПЗ».

**Summary.** The authors study isomerization gasoline fraction containing C7-C8 hydrocarbons. Based on the isomerization technology C7+ hydrocarbons «Isomalk-4» isomerization installation unit C7+ hydrocarbons «Isomalk-4» using ChemCAD program of Chemstation Company (USA) was created. wide gasoline fraction IBP–160 °C block fractionation was produced at enterprise LLC «ROil-Komsomolsk Refinery».

**Ключевые слова:** изомеризация гептана, катализатор, бензиновые фракции, переработка, изомалк, моделирование в ChemCAD.

**Key words:** heptane isomerization, catalyst, gasoline fractions, processing, isomalk, modeling in ChemCAD.

УДК 66.02

**Введение**

Одной из основных тенденций, влияющих на качество автомобильных топлив, является ужесточение экологических требований к выпускаемым моторным топливам. Требования приводятся в техническом регламенте «О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и топочному мазуту», утверждённом постановлением Правительства Российской Федерации от 27 февраля 2008 г.

Бензины, отвечающие требованиям «Евро», отличаются от обычных не октановым числом, а содержанием примесей.

Основные требования к характеристикам автомобильного бензина представлены в табл. 1.

Требования стандартов серии «Евро» к автомобильным бензинам

Показатели	Требования			
	Евро-2	Евро-3	Евро-4	Евро-5
Максимальное содержание:				
Сера, мг/кг	500	150	50	10
Бензол, % об.	5	1	1	1
Ароматик, % об.	-	42	35	35
Олефины, % об.	-	18	18	18
Кислород, % об.	-	2,7	2,7	2,7

Самым широко используемым каталитическим процессом производства топлив с повышенным октановым числом является процесс каталитического риформинга широкой бензиновой фракции. Получаемый катализат отличается повышенной концентрацией ароматических углеводородов, что не позволяет его использовать в качестве товарного высокооктанового бензина.

Для обеспечения качества моторного топлива, соответствующего требованиям технического регламента, необходимо обеспечить снижение содержания бензола в бензинах, выпускаемых российскими нефтеперерабатывающими заводами (НПЗ). Решение данной проблемы усложняется из-за значительной доли в бензинах риформата, содержание которого в последнем колеблется в пределах 2...8 %.

Снижения концентрации бензола в товарном топливе можно добиться следующими способами:

- удалением предшественников бензола из сырья;
- удалением бензола фракционированием катализата (данный способ требует последующего разбавления остатка катализата высокооктановым компонентом с ОЧИМ = 88 примерно в 2 раза) [1].

Авторы работы [2] выделяют экологически привлекательные компоненты автомобильных бензинов – алкилат, оксигенаты и изомеризат.

Проблема производства алкилата связана с недостаточными сырьевыми ресурсами на нефтеперерабатывающем предприятии.

В настоящее время в России наиболее широко используется МТБЭ (метилтретбутиловый эфир). Недостатками МТБЭ являются несоответствие экологическим требованиям (биоразлагаемость, растворимость в воде), незначительные ресурсы (1 % от общего производства бензина). При этом изомеризация бензиновых фракций характеризуется большим (до 99 %) выходом изомеризата, простотой технологии, меньшей себестоимостью по сравнению с процессами алкилирования и производства высокооктановых кислородсодержащих соединений [3].

#### Виды изомеризации С5-С6

Изомеризация n-парафинов в скелетные изомеры – обратимый экзотермический процесс; увеличению выхода высокооктановых изомеров, особенно сильно разветвлённых, благоприятствуют низкие температуры. Промышленные процессы осуществляются вблизи термодинамического равновесия. По этой причине показатели изомеризации в решающей степени определяются активностью катализаторов.

Широко распространены катализаторы на основе цеолитов (HS-10 фирмы «ЮОП», IP-632 Французского института нефти, катализатор Hysopag фирмы Sud-Chemie, отечественный катализатор СИ-1 НПП «Нефтехим»), хлористого алюминия (катализаторы ЮОП I-8; I-80, I-82тм, I-84тм, I-120, I-120тм, 122тм, катализаторы фирмы «ФИН» IS-614, IS-614A; RD-291 фирмы «Энгельгард»)

и его аналоги НИП-РД, НИП-3А, созданные российской фирмой «Олкат»). В последние годы получили распространение катализаторы на основе сульфатированного диоксида циркония (катализатор LPI-100 фирмы «ЮОП») и отечественные аналоги ИПК-2С фирмы «Олкат» и СИ-2 предприятия «Нефтехим».

Каталитические системы на основе сульфатированного диоксида циркония по каталитической активности превосходят цеолитные катализаторы и не уступают хлорированному оксиду алюминия, но значительно более устойчивы к воздействию примесей и способны к регенерации. Следует отметить, что все перечисленные катализаторы применяются для процесса изомеризации пентан-гексановой фракции. Для изомеризации алканов  $C_{7+}$  описанные выше системы малоэффективны из-за низкой селективности [4].

### Виды изомеризации $C_7-C_8$

Реакция изомеризации *n*-парафинов протекает в три стадии (см. рис. 1), различающиеся скоростями и последовательностью образования.



Рис. 1. Стадии изомеризации

Наиболее быстро образуются низкооктановые монометилзамещённые изомеры. Далее равновесная смесь метилзамещённых изомеров образует диметилзамещённые изомеры, причём константа скорости этой стадии на порядок ниже, чем первой. Кроме того, с увеличением молекулярной массы *n*-парафина наблюдается опережающий рост скорости крекинга. Поэтому основным направлением изомеризации углеводородов  $C_7-C_8$  является разработка катализаторов и условий проведения процесса изомеризации для повышения скорости образования диметилзамещённых изомеров и снижения крекинга *n*-парафинов.

Известен способ изомеризации углеводородов (ЕР №1491613, 7 С10G 35/085, С10G 45/62, 2004 год), содержащих, по меньшей мере, 50 мас. % углеводородов  $C_7-C_8$ , путём контактирования с катализатором, представляющим собой 0,1...2,0 мас. % платины, нанесённой на смесь оксидов циркония, вольфрама и алюминия. Контактное осуществляют при температуре 190...250 °С и давлении 0,8...10 МПа. Недостатками данного способа являются низкая активность процесса по отношению к превращению углеводородов с образованием ди- и три-метилзамещённых (ДиТМЗ) изомеров, высокая степень крекирования и низкое октановое число изомеризата. Например, при изомеризации за проход гидроочищенной прямогонной бензиновой фракции, в состав которой входит 85 мас. % углеводородов  $C_7-C_8$ , на катализаторе, содержащем в пересчёте на металл 13 мас. % алюминия, 38 мас. % циркония, 12,5 мас. % вольфрама и 0,5 мас. % платины, при температуре 220 °С, давлении 3,0 МПа, мольном отношении «водород : сырьё», равном 2,0, и объёмной скорости подачи сырья 1,5 ч<sup>-1</sup>, активность в образовании ДиТМЗ-изомеров составляет 8,9 %, а октановое число изомеризата по исследовательскому методу – 62 пункта.

Близким по технической сущности является улучшенный способ изомеризации фракции  $C_7$  с раскрытием нафтеновых циклов (заявка Франции № 2857371, 7 С10G 65/08, С10G 45/58, 2005 год), который включает выделение углеводородной фракции  $C_7-C_8$ , содержащей до 10 мас. % углеводородов  $C_5-C_6$  и до 10 мас. % углеводородов  $C_8$ , которую подвергают гидрированию, разрыву нафтеновых колец и изомеризации при температуре 90 °С, давлении 3,0 МПа, мольном отношении «водород : сырьё», равном 0,2, и объёмной скорости подачи сырья 1 ч<sup>-1</sup> на катализаторе, содержащем платину на хлорированном оксиде алюминия.

Недостатками этого способа являются высокие капитальные и эксплуатационные затраты из-за проведения трёх процессов вместо одного – изомеризации. Способ недостаточно гибкий, так

как при низком содержании ароматических углеводородов в сырье процесс гидрирования не нужен. По данным примера, приведённого в этом патенте, разрыв нафтеновых колец протекает всего лишь на 45 %, что тоже не оправдывает строительство и эксплуатацию дополнительной установки. Низкое октановое число продукта получают при изомеризации смеси алкановых углеводородов  $C_7$ - $C_8$  и продукта двух установок: гидрирования и разрыва нафтеновых колец.

В примере, приведённом в этом патенте, при изомеризации смеси потока алкановых углеводородов  $C_7$ - $C_8$  и потока, выходящего с установки разрыва нафтеновых колец, на 0,5 мас. % платины, нанесённой на хлорированный оксид алюминия, при температуре 90 °С, давлении 3,0 МПа, мольном отношении «водород : сырьё», равном 0,2, и объёмной скорости подачи сырья 1 ч<sup>-1</sup> октановое число по исследовательскому методу составляет 50,2 пункта, а активность в образовании ДиТМЗ изомеров – 7,8 %.

Одним из процессов изомеризации «тяжёлых» n-алканов, в частности, гептансодержащих бензиновых фракций, является российская разработка. В последние 5 лет данным вопросом занималась отечественная компания ПАО НПП «Нефтехим», которая добилась видимых результатов: с её участием появился на рынке перспективный процесс переработки гептансодержащих бензиновых фракций «Изомалк-4» (см. прим. 1); основные параметры процесса представлены в табл. 2.

Основой разработки является катализатор изомеризации СИ-4, обладающий уникально высокой селективностью в изомеризации  $C_7$ -парафиновых углеводородов. Катализатор, содержащий гидрирующе-дегидрирующий компонент на оксидном носителе, представляющем собой композицию оксидов металлов  $aAl_2O_3 \cdot bZrO_2 \cdot cWO_3 \cdot dTiO_2 \cdot eMnO_2$ , где массовые доли оксидов равны:  $a=4...30$  %;  $b=60...90$  %;  $c=5...15$  %;  $d=0,1...10$  %;  $e=0,1...1$  %. Катализатор в качестве гидрирующе-дегидрирующего компонента содержит 0,2...0,7 мас. % платины, либо палладия, либо иридия, либо смеси этих металлов.

Таблица 2

Основные параметры процесса «Изомалк-4»

Параметр	Значение
Температура, °С	160...250
Давление, МПа	2,5...3,0
Объёмная скорость, ч <sup>-1</sup>	1,0...5,0
Мольное соотношение «H <sub>2</sub> : сырьё»	0,5...4,0
Октановое число изомеризата, ИМ	83...85
Содержание ароматических углеводородов, % мас.	0
Выход изомеризата, % мас.	92...95
Межрегенерационный период, лет	2...3
Срок службы катализатора, лет	8...10

### Расчёт установки

На основе этой технологии был произведён анализ возможности реконструкции установки каталитической изомеризации на базе имеющейся установки Комсомольского НПЗ.

На рис. 2 представлена имеющаяся схема переработки фракции н.к.–160 °С на Комсомольском НПЗ. В процесс изомеризации вовлечена лёгкая бензиновая фракция н.к.–75 °С, а узкая фракция 75–100 °С выводится на участок приготовления бензинов комсомольского предприятия как прямоугольный низкооктановый компонент товарного бензина. Это связано с невозможностью её переработки ни в катализат установок риформинга из-за образования больших количеств бензола и толуола, ни в изомеризат установки изомеризации из-за низкой селективности эксплуатируемого катализатора IS-614А в отношении данной фракции.

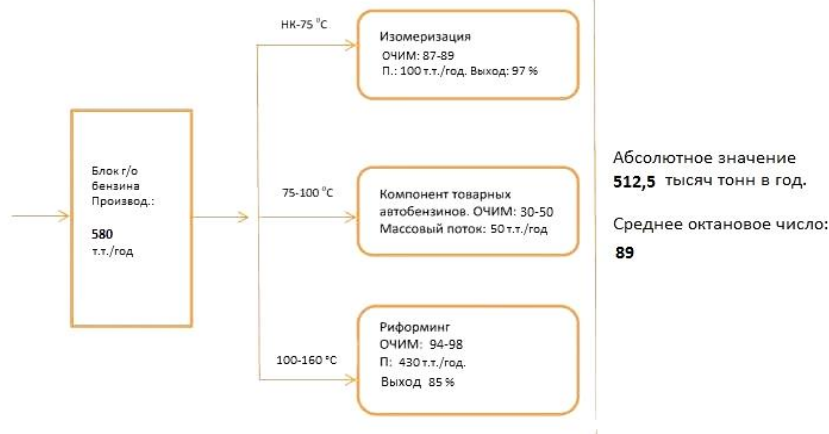


Рис. 2. Схема переработки фракции н.к.–160 °С на Комсомольском НПЗ

Составим материальный баланс процесса фракционирования гидроочищенной бензиновой фракции н.к.–160 °С (см. табл. 3), используемого в настоящий момент на Комсомольском НПЗ (см. рис. 2).

Таблица 3

Материальный баланс процесса разделения фракции н.к.–160 °С

Фракция	Расход			
	% (мас.)	т/Г	т/ч	кг/с
Вход				
н.к.–160 °С	100,0	580 000	72,5	20,14
Итого	100,0	580 000	72,5	20,14
Выход				
н.к.–75 °С	17,2	100 000	12,5	3,47
75–100 °С	8,6	50 000	6,25	1,74
100–160 °С	74,2	430 000	53,75	14,93
Итого	100,0	580 000,0	72,5	20,14

Для работы установки изомеризации «Изомалк-4» необходимо сырьё – фракция 75–100 °С.

Дальнейшие расчёты проведём с использованием системы автоматизированного проектирования ChemCAD.

В первую очередь смоделируем работу блока разделения бензиновой фракции н.к.–160 °С. В данном случае состав сырья лучше представить в виде набора углеводородов, а не узких фракций, так как для расчёта установки изомеризации потребуется знание углеводородного состава фракции 75–100 °С.

При ориентации на источник [5], ИТК фракции н.к.–160 °С и базу данных САПР ChemCAD был представлен состав фракции н.к.–160 °С в виде модельного набора индивидуальных углеводородов для упрощения моделирования.

В составе модельной смеси присутствовали углеводороды C<sub>1</sub>–C<sub>4</sub>, н-пентан, н-гексан, углеводороды C<sub>7</sub>, нормальные углеводороды C<sub>8</sub>–C<sub>11</sub>. На рис. 3 приведён массовый расход основных технологических потоков схемы разделения фракции н.к.–160 °С и углеводородный состав модельной смеси.

На рис. 4 представлена принципиальная схема разделения бензиновой фракции н.к.–160 °С с указанием параметров технологических потоков (температура, давление, массовый рас-

ход). Параметры разделения подобраны с учётом режима работы существующего колонного и теплообменного оборудования (колонна К-1 и теплообменник Т-2 установки каталитического риформинга, колонна К-320 и теплообменник Т-320 установки изомеризации).

В данной схеме приняты следующие обозначения: цифры в круглом обрамлении приписаны к аппаратам, в квадратном – к материальным потокам. Условно изображены: 1 – фракционирующая колонна К-1 установки риформинга; 2 – фракционирующая колонна К-320 блока изомеризации; 3 – теплообменник Т-2 установки риформинга; 4 – теплообменник Т-320 установки изомеризации; 5 – холодильник Х-2 установки риформинга.

По потокам приняты следующие обозначения: 1, 6 – сырьё с блока гидроочистки (фракция н.к.–160 °С); 2, 7 – сырьё установки риформинга (фракция 100–160 °С); 3, 5, 8 – сырьё, идущее в колонну фракционирования К-320 блока изомеризации (фракция н.к.–100 °С); 4 – сырьё блока изомеризации (фракция н.к.–75 °С); 9, 10 – сырьё установки «Изомалк-4» (фракция 75–100 °С).

Stream No.	1	2	4	10
Name				
Flowrates in kg/h				
Methane	1.4500	0.0000	1.4500	0.0000
Ethane	2.9000	0.0000	2.9000	0.0000
Propane	109.4750	0.0000	109.4750	0.0000
N-Butane	1041.1000	0.0000	1041.1000	0.0000
N-Pentane	4293.4500	0.0000	4293.4500	0.0000
N-Hexane	7021.6250	0.0020	6687.5195	334.1035
Methylcyclopenta	852.6000	0.0001	161.9947	690.6052
2-2-Dimethylpent	10.1500	0.0001	0.0004	10.1495
Benzene	81.9250	0.0000	71.8614	10.0636
2-4-Dimethylpent	42.0500	0.0006	0.0004	42.0490
2-2-3-Trimethylb	3.6250	0.0001	0.0000	3.6249
Cyclohexane	544.4750	0.0140	0.0087	544.4523
3-3-Dimethylpent	7.2500	0.0009	0.0001	7.2490
2-3-Dimethylpent	135.5750	0.0457	0.0000	135.5293
2-Methylhexane	320.4500	0.0856	0.0000	320.3644
3-Methylhexane	944.6750	0.4767	0.0000	944.1983
3-Ethylpentane	42.7750	0.0415	0.0000	42.7335
N-Heptane	1493.5000	5.3234	0.0000	1488.1766
Methylcyclohexan	1755.9500	35.1189	0.0000	1720.8311
N-Octane	22215.4500	21771.1400	0.0000	444.3100
N-Nonane	23083.2750	23083.2345	0.0000	0.0405
N-Decane	8220.0500	8220.0500	0.0000	0.0000
N-Undecane	276.2250	276.2250	0.0000	0.0000

Рис. 3. Массовый расход индивидуальных углеводородов по технологическим потокам

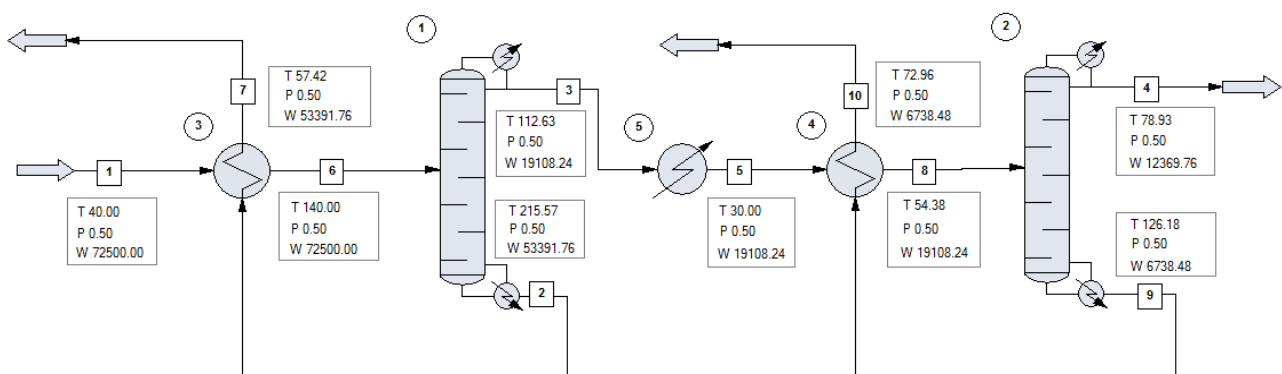


Рис. 4. Принципиальная схема разделения фракции н.к.–160 °С

После произведённого моделирования получен новый материальный баланс блока разделения фракции н.к.–160 °С, найденный с учётом принятого модельного состава сырья. Он представлен в табл. 4.

### Уточнённый материальный баланс разделения фракции н.к.–160 °С в соответствии с моделированием

Фракция	Расход			
	% (мас.)	т/Г	т/ч	кг/с
<b>Вход</b>				
н.к.–160 °С	100,0	580 000	72,5	20,14
Итого	100,0	580 000	72,5	20,14
<b>Выход</b>				
н.к.–75 °С	17,06	98 958	12,37	3,44
75–100 °С	9,29	53 908	6,74	1,87
100–160 °С	73,64	427 134	53,39	14,83
Итого	100,0	580 000,0	72,5	20,14

Для анализа возможности реконструкции было произведено моделирование с использованием системы автоматизированного проектирования ChemCAD. Для работы установки изомеризации «Изомалк-4» было принято сырьё – фракция 75–100 °С. На схеме, моделирующей работу установки изомеризации «Изомалк-4» (см. рис. 5), приняты следующие обозначения: цифры в круглом обрамлении приписаны к аппаратам, в квадратном – к материальным потокам.

На рис. 5 условно изображены: 1 – узел смешения; 2 – реактор процесса изомеризации; 3 – сепаратор высокого давления для отделения ВСГ; 4 – стабилизационная колонна; 5 – теплообменник; 6 – колонна деизогептанзации; 7, 8 – теплообменник (холодильник); 9 – печь; 10 – клапан понижения давления.

По потокам приняты следующие обозначения: 1 – сырьё (фракция 75–100 °С); 2 – свежий ВСГ; 3, 15 – газо-сырьевая смесь; 4, 13, 14 – газо-продуктовая смесь; 5 – отработанный ВСГ; 6, 9 – нестабильный изомеризат; 7 – газы стабилизации; 8, 10, 16 – стабильный изомеризат; 11 – готовый изомеризат; 12 – рецикл низкооктановых гептанов.

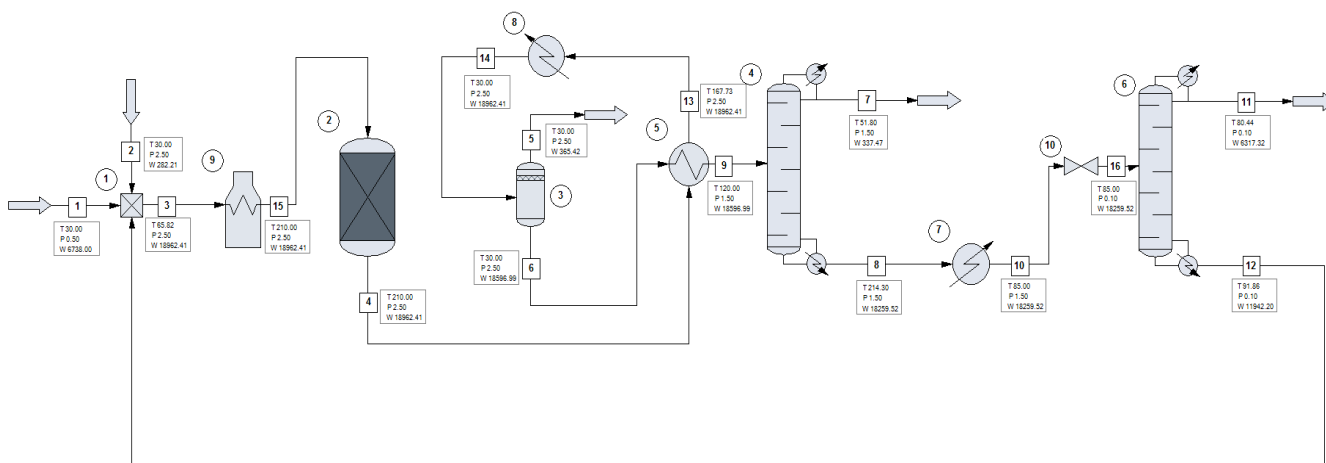


Рис. 5. Модель процесса изомеризации «Изомалк-4»

Для моделирования процесса изомеризации ChemCAD было необходимо использовать кинетический реактор, что потребовало наличия следующих данных:

- основные реакции, протекающие в реакторе [7];
- предэкспоненциальный множитель и энергия активации для каждой реакции [8].

Состав сырья процесса изомеризации по технологии «Изомалк-4» представлен в табл. 5. С учётом того, что некоторые углеводороды сырья полностью переходят в рецикл после разделения изомеризата и, как следствие, происходит накопление их в системе, было необходимо принять допущение и исключить их для упрощения расчёта.

Таблица 5

Состав сырья процесса «Изомалк-4»

Углеводород	Массовый расход, кг/ч	
	согласно смоделированному процессу разделения	с учётом принятых допущений
1	2	3
Н-гексан	334,1035	334,1035
Метилциклопентан	690,6052	690,6052
2,2-диметилпентан	10,1495	10,1495
Бензол	10,1495	10,1495
2,4-диметилпентан	42,0490	42,0490
2,2,3-триметилбутан	3,6249	3,6249
Циклогексан	544,4523	544,4523
3,3-диметилпентан	7,2490	7,2490
2,3-диметилпентан	135,5293	135,5293
2-метилгексан	320,3644	320,3644
3-метилгексан	944,1983	944,1983
3-этилпентан	42,7335	0
Н-гептан	1488,1766	3696,0917
Метилциклогексан	1720,8311	0
Н-октан	444,3100	0
Н-нонан	0,0405	0
Итого	6738,4807	6738,4807

Для моделирования ректификационных колонн был выбран тип приближённого расчёта ректификации (SHOR). Для всех моделируемых ректификационных колонн был выбран парциальный тип конденсатора, так как в данном случае подразумевается частичная конденсация потока, отбираемого по верху колонны.

Так как моделирование процесса осуществляется с использованием сырья, представляющего собой набор определённых углеводородов, то в качестве определяющего параметра при моделировании процессов разделения выступает степень разделения.

В типе приближённого расчёта ректификации задаём, что наиболее легкокипящий компонент, поступающий в ректификационную колонну, полностью испаряется и выходит с верха колонны, а наиболее тяжёлый компонент, поступающий на разделение, полностью конденсируется в колонне и выходит с низа колонны. Степень разделения всех остальных углеводородов рассчитываются программой автоматически в соответствии с заданными начальными параметрами [6].

Примем, что по потоку 2 поступает чистый водород, тогда при мольном соотношении «водород: сырьё = 2:1» количество поступающего водорода будет равно 282,21 кг/ч.

На рис. 6 представлен материальный баланс основных потоков установки «Изомалк-4», таких как поток 1 – состав сырья; поток 11 – состав готового изомеризата; поток 12 – состав рециркулята.

Stream No.	1	11	12
Name			
-- Overall --			
Actual dens kg/m <sup>3</sup>	688.0360	641.4488	627.0706
Flowrates in kg/h			
Hydrogen	0.0000	0.0000	0.0000
Propane	0.0000	0.0003	0.0000
N-Butane	0.0000	0.1066	0.0000
N-Hexane	334.0000	315.8053	0.0000
Methylcyclopenta	691.0000	682.1674	0.0000
2-2-Dimethylpent	10.0000	280.9274	0.0000
Benzene	10.0000	9.9175	0.0000
2-4-Dimethylpent	42.0000	1421.6400	0.0000
2-2-3-Trimethylb	4.0000	103.7713	0.0000
Cyclohexane	544.0000	540.7105	0.0000
3-3-Dimethylpent	7.0000	1253.4421	0.0000
2-3-Dimethylpent	136.0000	1631.1314	181.2329
2-Methylhexane	320.0000	63.9884	575.8953
3-Methylhexane	944.0000	0.0000	10773.5692
N-Heptane	3696.0000	0.0000	411.4979

Рис. 6. Материальный баланс установки «Изомалк-4»

### Расчёт октанового числа смешения

Октановое число компонента в смеси может отличаться от этого показателя в чистом виде. Каждый компонент имеет свою смесительную характеристику, или, как её ещё принято называть, октановое число смешения. В связи с этим расчёт октанового числа осуществим с использованием методики, отражённой в источнике [9].

Результаты расчётов изображены на рис. 7.

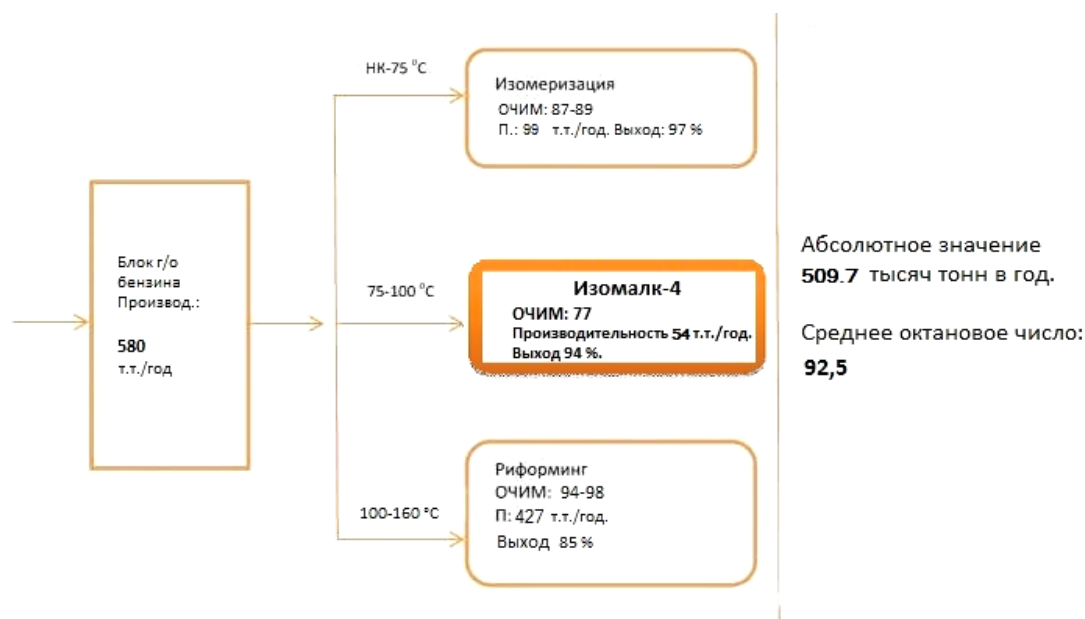


Рис. 7. Предложенная схема переработки фракции н.к.–160 °С на Комсомольском НПЗ

### Выводы

В связи с ужесточающимися требованиями к качеству моторных топлив, ростом конкуренции со стороны альтернативных видов топлива, сокращением запасов нефтегазового сырья перед нефтеперерабатывающими компаниями встаёт необходимость интенсифицирования производства увеличением глубины переработки, модернизацией внедрённых процессов и внедрением современных высокоэффективных процессов, обеспечивающих заданное качество товарных нефтепродуктов.

Одним из таких процессов является изомеризация «тяжёлых» n-алканов, в частности, гептансодержащих бензиновых фракций. В настоящее время, к сожалению, нет промышленно внедрённых установок подобного типа.

Но теоретические исследования в данной области шагнули далеко вперёд. Подробно изучен механизм изомеризации n-гептана, разработаны лабораторные композиции катализаторов, позволяющих осуществить изомеризацию n-гептана, причём в смеси с другими углеводородами, с высокими выходами целевых полиразветвлённых изомеров гептана.

В последние годы решением этого вопроса занималась отечественная компания по разработке технологий и катализаторов нефтепереработки ПАО НПП «Нефтехим», добившаяся видимых результатов: с её участием появилась на рынке перспективная технология переработки гептансодержащих бензиновых фракций «Изомалк-4». Главной целью стал процесс моделирования работы установки изомеризации по технологии «Изомалк-4», которая была успешно достигнута, что подтверждают следующие достижения:

1. В среде САПР ChemCAD смоделированы блок подготовки сырья и установка изомеризации гептансодержащего сырья с использованием данных действующего предприятия ООО «РН-Комсомольский НПЗ».

2. Используемые в проекте современные литературные данные (кинетические параметры и механизм изомеризации n-гептана) подтверждаются результатами моделирования в среде ChemCAD, при этом обеспечиваются высокая степень конверсии n-гептана и большой выход целевых изомеров гептана (ди- и тризамещённых).

3. Расчёт октанового числа подтверждает правильность использованных входных данных и методов моделирования – прирост октанового числа составил около 40 пунктов.

Резюмируя вышеизложенное, отметим, что внедрение технологии «Изомалк-4» на предприятия нефтеперерабатывающего комплекса позволит значительно увеличить фонд высокооктановых топлив предприятий и степень использования сырья (глубину переработки). Появление в материальном балансе предприятия дополнительного количества высокооктановой добавки в виде продукта изомеризации фракции 75–100 °С позволит решить проблемы, связанные с применением октаноповышающих присадок, со снижением концентрации ароматических углеводородов, в частности, бензола, в товарных топливах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гаврилов, Н. В. Получение экологически чистых бензинов, соответствующих евростандартам / Н. В. Гаврилов, О. В. Дуров // Химия и технология топлив и масел. – 2008. – № 6. – С 9-12.
2. Мириманян, А. А. Промышленный опыт работы установок изомеризации пентан-гексановой фракции / А. А. Мириманян, А. Г. Вихман, А. А. Мкртычев // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2006. – № 4. – С 22-31.
3. Получение экологически чистых компонентов бензинов / М. В. Вишнецкая, Р. А. Газаров, Е. Н. Козлова, И. В. Воронцова // Химия и технология топлив и масел. – 2005. – № 6. – С 45-47.
4. Кузнецова, Л. И. Каталитические свойства диоксида циркония, модифицированного вольфрамат-анионами в реакции изомеризации n-гептана / Л. И. Кузнецова, А. В. Казбанова, П. Н. Кузнецов // Нефтехимия. – 2012. – Т. 52. – № 2. – С. 104-108.
5. Интенсификация работы установки низкотемпературной изомеризации лёгкой бензиновой фракции ООО «РН-Комсомольский НПЗ» / В. В. Ежов, В. В. Мелехин, К. Г. Камалов, М. Г. Муращенко // Нефтяное хозяйство. – 2006. – № 9. – С. 76-79.



6. Зиятдинов, Н. Н. Математическое моделирование химико-технологических систем с использованием программы ChemCAD / Н. Н. Зиятдинов, Т. В. Лаптева, Д. А. Рыжов. – Казань: ФГБОУ ВПО «КГТУ», 2008. – 161 с.
7. Kints, V. Hydroisomerization of n-heptane using zeolite membrane separation technology / V. Kints [e.t.c.] // Delft University of Technology. – 2001. – №. 3 – P. 140-146.
8. Muneed, K. n-Heptane isomerization over Pt/WO<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>: A kinetic study / K. Muneed, S. Al-Khattaf // Applied Catalysis. – 2009. – Vol. 362. – №. 1. – P. 56-64.
9. Riazi, M. R. Characterization and properties of petroleum fractions / M. R. Riazi. – Philadelphia: ASTM, 2005. – P. 427.

## ПРИМЕЧАНИЯ

1. «ИЗОМАЛК-4» – технология изомеризации гептановой фракции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nefthim.ru/node/179>.

**Романюк Е. В.**  
**E. V. Romanyuk**

## **ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА ОБЩЕГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ НА ДВУХСЛОЙНЫХ ФИЛЬТРАХ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА**

### **FEATURES OF THE CALCULATION OF TOTAL PRESSURE DROP IN TWO-LAYER FILTERS FOR AIR PURIFICATION**

**Романюк Елена Васильевна** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры пожарной безопасности объектов защиты Воронежского института – филиала Ивановской пожарно-спасательной академии ГПС МЧС России (Россия, Воронеж). E-mail: scercso@mail.ru.

**Ms. Elena V. Romanyuk** – Ph. D. in Engineering, associate Professor, Department of fire safety protection objects, Voronezh Institute - branch of Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Russia, Voronezh). E-mail: scercso@mail.ru.

**Аннотация.** При работе фильтров-пылеуловителей различного типа важнейшим параметром является перепад давления на фильтровальной перегородке. По данному параметру оцениваются вид и стадия фильтрования, необходимость и интенсивность регенерации. В статье приведены аналитические формулы расчёта перепада давления на двухслойных фильтрах со связанной и несвязанной структурами слоя. В качестве двухслойного фильтра с несвязанной структурой использовался модельный фильтр с гранулами корундового легковеса различного размера, со связанной структурой – модельный фильтр из слоя стеклоткани и металлокерамической втулки. Предложенные аналитические формулы позволяют учитывать такие параметры, как высота фильтровального слоя, размер гранул и каналов в фильтровальном материале, дисперсность и концентрация пыли. Данные формулы позволяют прогнозировать общий перепад давления с течением времени. Полученные уравнения подтверждены экспериментальными данными и могут служить для автоматизации работы аспирационных систем с фильтрами-пылеуловителями представленного типа. Так как формулы учитывают максимальное количество параметров, влияющих на процесс фильтрования, то они достаточно громоздки, поэтому на их основе разработаны программные продукты для ЭВМ, упрощающие расчёты. Приведены экспериментальные и теоретические графические зависимости общего перепада давления от продолжительности фильтрования.

**Summary.** The most important operating parameter of dust collector filters is the pressure drop on the filter screen. The type and stage of filtering, necessity and intensity of regeneration are estimated by this parameter. The article presents analytical formulas for calculating the pressure drop on two-layer filters with associated and unbound layer structure. The model of two-layer filter with an unbound structure is used corundum granules of different sizes; the model of associated structure filter is used a layer of fiberglass and ceramic-metal sleeve. The proposed analytical formulas allow to take into account such parameters as the height of the filter layer, the size of granules and channels in the filter material, dispersion and dust concentration. Also, these formulas allow you to predict the total pressure drop over time. The equations obtained are confirmed by experimental data and can be used to automate the operation of aspiration systems with filters-dust collectors of the presented type. Since the formulas take into account the maximum number of parameters that affect the filtering process, they are quite cumbersome, so they are based on software products for computers that simplify calculations. Experimental and theoretical graphical dependences of the total pressure drop on the duration of filtering are presented.

**Ключевые слова:** фильтр, зернистый фильтр, комбинированный фильтр, пылеулавливание, аспирация, перепад давления, давление.

**Key words:** filter, granular filter, combined filter, dust collection, aspiration, pressure drop, pressure.

УДК 62-9, 681.5



### Введение

Вопросы пылеулавливания при очистке воздуха актуальны практически для любого промышленного предприятия. Задача по обеспечению эффективного пылеулавливания может решаться с помощью различных аппаратов, одними из которых являются фильтры. Зернистые фильтры со связанной и несвязанной структурами находят своё применение при работе с различными пылегазовыми потоками. При эксплуатации зернистых фильтров основным параметром является перепад давления на фильтровальной перегородке, поэтому вопрос получения аналитической формулы для расчёта перепада давления решался и продолжает решаться учёными [1; 2]. Определение кинетики перепада давления позволяет прогнозировать режимы работы с учётом параметров пылегазового потока и фильтра, поэтому при создании новых конструктивных решений, таких как комбинированные многослойные фильтры, актуальным является решение вопросов прогнозирования их характеристик. Знание характера зависимости общего перепада давления позволяет успешно автоматизировать работу систем аспирации.

### Постановка задачи

Интересным решением в области пылеулавливания являются комбинированные двухслойные зернистые фильтры со связанной и несвязанной структурами, выполняющие двухступенчатую очистку. Применение комбинированных фильтров позволяет увеличить ресурс их работы и сэкономить производственные площади, так как оно может стать альтернативой двухступенчатым системам очистки пылегазового потока. Для фильтров такого типа не существует аналитических зависимостей для определения общего перепада давления, что является существенной проблемой, так как кинетика перепада давления на фильтре – важный показатель работы пылеуловителей данного типа.

### Методы исследований

При написании статьи и получении аналитических формул использовали закономерности, приведённые в теории механики аэрозолей, в теориях процесса фильтрования воздушных потоков и аэродинамики воздушных и жидкостных потоков [6]. Для подтверждения адекватности полученных моделей проводили эмпирические исследования, в которых использовали методики Научно-исследовательского института по промышленной и санитарной очистке газов (г. Москва) и Научно-исследовательского института цветных металлов (г. Москва). Для подтверждения адекватности полученных результатов использовали статистические методы обработки полученных экспериментальных данных.

Интересным решением в области пылеочистки являются фильтры с несвязанной структурой зернистого слоя, состоящие из двух подслоев. Первый слой, состоящий из более крупной фильтровальной среды, осуществляет грубую очистку от низкодисперсной пыли, второй, состоящий из мелких гранул фильтровальной среды, – очистку от высокодисперсной пыли. Такие фильтры легко регенерируются и удобны для автоматизации процесса пылеулавливания.

Для контроля процесса фильтрования была получена аналитическая формула расчёта общего перепада давления. В экспериментах применяли двухслойный фильтр, состоящий из корундовых гранул: первый слой имел средний диаметр зерна  $d_{31} = (1-1,5) \cdot 10^{-2}$  м, второй –  $d_{31} = (0,2-0,5) \cdot 10^{-2}$ . Фильтровальный модуль имел плоскую форму.

В процессе фильтрования предполагается, что в первом, более грубом, слое процесс фильтрования проходит с образованием «автофильтра», который тоже выполняет функцию фильтровальной среды впоследствии; далее, во втором слое фильтрование реализуется с постепенным забиванием каналов зернистого слоя. Здесь воздух очищается от высокодисперсной пыли.

С учётом сделанных предположений выражение для определения общего перепада давления будет иметь вид [4]

$$\Delta P = \Delta P_a + \Delta P_{3n1} + \Delta P_{3n2}, \quad (1)$$

где  $\Delta P_a$  – перепад давления, возникающий из-за образования «автофилтра», Па;  $\Delta P_{зп1}$  – перепад давления вследствие закупоривания каналов первого фильтровального слоя, Па;  $\Delta P_{зп2}$  – перепад давления вследствие закупоривания каналов второго фильтровального слоя, Па.

В ходе фильтрования за счёт образования «автофилтра» (тонкого слоя пыли) и очистки в первом по ходу слое корундового наполнителя из пылевоздушного потока удаляются низкодисперсные частицы и во втором слое корундовых гранул процесс идёт лишь с забиванием каналов («пор») слоя высокодисперсными частицами.

Как известно, коэффициент проскока пыли  $K$  и эффективность пылеулавливания  $\Xi$  соответственно для полидисперсных пылей меняются со временем:  $K = f(\tau)$ .

Для слоя осадка на первом по ходу пылегазового потока слое высотой  $h_1$  с радиусом слоя осадка  $R_{ос}$  имеем соотношение

$$V = \frac{\pi R_{ос}^2 \tau \Delta P}{h_1 r_{ос}}, \quad (2)$$

где  $V$  – объём прошедшего газа, м<sup>3</sup>;  $R_{ос}$  – радиус слоя осадка, м;  $\tau$  – продолжительность фильтрования, с;  $\Delta P$  – перепад давления на фильтровальном слое, Па;  $h_1$  – высота фильтровального слоя, м;  $r_{ос}$  – удельное сопротивление осадка, Н·с/м<sup>4</sup>.

Из выражения (2) получим

$$\frac{dP}{dV} = \frac{r_{ос}}{\pi R_{ос}^2 \tau}, \quad (3)$$

$$dP = \frac{r_{ос} dV}{\pi R_{ос}^2 \tau}. \quad (4)$$

После преобразований и подстановок получили аналитическое выражение, характеризующее перепад давления в первом слое корундовых гранул, где процесс идёт преимущественно с образованием «автофилтра»:

$$\Delta P_a = \frac{Q^2 \cdot x_n \cdot r_{ос} \tau}{\pi^2 R_{ос}^4}, \quad (5)$$

где  $Q$  – расход пылегазового потока, м<sup>3</sup>/ч;  $x_n$  – начальная концентрация пыли в потоке, кг/м<sup>3</sup>.

Для определения перепада давления во втором слое с меньшим размером корундовых гранул предполагаем, что процесс в основном осуществляется с забиванием каналов. Для моделирования процесса используем формулу (6), описывающую процесс в трубопроводе, однако в нашем случае в качестве трубопровода выступает единичный канал фильтровального слоя:

$$\Delta P_{зп1} = \lambda \frac{l}{d_s} \cdot \frac{\rho w^2}{2}, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент сопротивления пылевоздушному потоку в каналах фильтра, Па·с/кг;  $l$  – длина трубопровода, м;  $\rho$  – плотность пылегазового потока, кг/м<sup>3</sup>;  $w$  – действительная скорость потока в каналах зернистого слоя, м/с;  $d_s$  – диаметр эквивалентный, м [6].

Для движения через фильтровальный слой с несвязанной структурой учитываются  $l$  – длина канала или высота фильтровального слоя и  $d_s$  – диаметр канала фильтровального слоя.

При движении газа через слой гранулированного материала возникает турбулентный режим, и коэффициент гидравлического сопротивления можно найти по формуле

$$\lambda = \frac{64}{Re} = \frac{4\mu}{\omega\delta_3\rho}, \quad (7)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость пылевоздушного потока, Па·с;  $Re$  – критерий Рейнольдса [6].

После подстановки выражения (7) в выражение (6) получим

$$\Delta P_{\text{зп1}} = \frac{32\mu lw}{d_3^2}. \quad (8)$$

Площадь каналов фильтровального слоя равна

$$S_{\text{к}} = \frac{\pi d_3^2 N}{4}, \quad (9)$$

где  $N$  – количество каналов на единицу площади.

С учётом (7) скорость потока в порах зернистого слоя равна

$$w = \frac{V}{S_{\text{к}}} = \frac{4V}{\pi d_3^2 N}. \quad (10)$$

После подстановки получаем

$$\Delta P_{\text{зп1}} = \frac{32\mu l 4V}{\pi d_3^4 N}. \quad (11)$$

Зная площадь фильтровального слоя и среднюю площадь канала фильтровального слоя, можно легко найти количество каналов на поверхности фильтровального элемента:

$$N = \frac{S_{\text{об}}}{S_3} = \frac{4\pi R^2}{\pi d_3^2} = \frac{4R^2}{d_3^2}, \quad (12)$$

где  $S_{\text{об}}$  – площадь фильтровальной поверхности, м<sup>2</sup>;  $R$  – радиус фильтровального слоя, м;  $S_3$  – площадь сечения одного зерна слоя, м<sup>2</sup>;  $d_3$  – средний диаметр зерна слоя, м.

С учётом того, что диаметр каналов приблизительно равен эквивалентному диаметру пористого пространства  $d_3 = d_3$ , получим

$$\Delta P_{\text{зп1}} = \frac{32\mu l V d_3^2}{\pi d_3^4 4R^2} = \frac{8\mu l V}{\pi r_3^2 R^2} = \frac{8\mu l V}{S_{\text{к}} R^2}. \quad (13)$$

Так как каналы в фильтровальном слое не являются прямолинейными, следует внести поправку в определение длины канала. Длина канала будет рассчитываться как  $l = h_1 \cdot T$ , где  $h_1$  – высота первого фильтровального слоя, м;  $T$  – коэффициент извилистости канала, равный, согласно литературным данным, 1,75.

Зависимость общего перепада давления от продолжительности процесса фильтрования выражается так:

$$\Delta P_{\text{зн}2}(\tau) = \frac{14\mu h_1 V}{S_k(\tau) R^2}. \quad (14)$$

Площадь канала  $S_k$  будет изменяться согласно

$$S_k(\tau) = \pi r^2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) - \frac{x\tau}{h_1}. \quad (15)$$

Эффективность улавливания  $\mathcal{E}$  находим согласно  $\mathcal{E} = 1 - K = 1 - Ke^{-m\tau}$ , где  $K$  – начальный проскок пыли;  $m$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий специфику слоя;  $\tau$  – продолжительность фильтрования, с.

С учётом (15) выражение (14) приобретёт вид

$$\Delta P_{\text{зн}1}(\tau) = \frac{14\mu h_1 V}{\left(\pi r_3^2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) - \frac{(1 - Ke^{-m\tau}) \cdot \tau}{h_1}\right) \cdot R^2}. \quad (16)$$

С помощью аналитического выражения (5) можно описать кинетику перепада давления на первом слое фильтра, высота которого  $h_1$ .

Во втором фильтровальном слое фильтрование происходит за счёт постепенного забивания каналов слоя пылью, поэтому для данного слоя можно применить выражение (16). Во втором фильтровальном слое с течением времени изменяются высота слоя  $h_2$  и радиус зёрен фильтровального слоя  $r_{32}$ . Уменьшается входная концентрация пыли  $x_2$  в пылегазовом потоке согласно закономерности

$$x_2 = x_n K_n^2 e^{-2m\tau}. \quad (17)$$

Следовательно, уравнение (16) с учётом (17) будет выглядеть следующим образом:

$$\Delta P_{\text{зн}2}(\tau) = \frac{14\mu h_2 V}{\left(\pi r_{32}^2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) - \frac{(x_n K_n^2 e^{-2m\tau}) \tau}{h_2}\right) R^2}, \quad (18)$$

где  $r_{32}$  – радиус зерна второго по ходу газа фильтровального слоя, м.

Учитывая полученные закономерности (1), (5), (16) и (18), можно вывести выражение для определения общего перепада давлений на двухслойном фильтре с несвязанной структурой:

$$\Delta P(\tau) = \frac{Q^2 x_n r_{\text{ос}} \tau}{\pi^2 R^4} + \frac{14\mu h_1 Q}{\left(\pi r_3^2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) - \left(\frac{1 - Ke^{-m\tau}}{h_1}\right)\right) R^2} + \frac{14\mu h_2 Q}{\left(\pi r_{32}^2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) - \frac{(x_n K_n^2 e^{-2m\tau}) \tau}{h_2}\right) R^2}, \quad (19)$$

где  $x_n$  – начальная эффективность улавливания слоя.

На рис. 1, а представлены графические зависимости  $\Delta P = f(\tau)$  для экспериментальных данных и по уравнению (19), на рис. 1, б – графические зависимости  $\Delta P_{\text{общ}} = f(\tau)$ , полученные расчётным путём и экспериментально для комбинированного фильтра со связанной структурой.

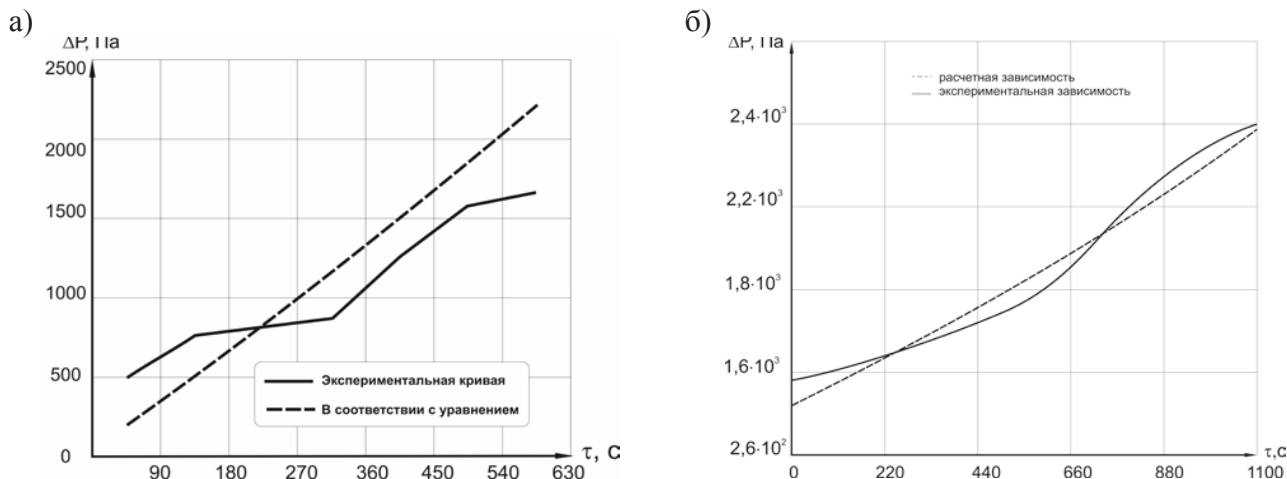


Рис.1. Зависимости общего перепада давления на фильтре от продолжительности фильтрования: а – зависимости  $\Delta P = f(\tau)$ , полученные по уравнению (29) и экспериментально для двухслойного фильтра с несвязанной структурой:  $R = 0,05$  м;  $h_1 = h_2 = 0,02$  м;  $r_3 = 0,005$  м;  $r_{3,2} = 0,004$  м; б – графические зависимости  $\Delta P_{\text{общ}} = f(\tau)$ , полученные расчётным путём и экспериментально для комбинированного фильтра со связанной структурой

В процессе математической обработки экспериментальных данных (7 опытов) и анализа полученной аналитической зависимости было определено, что среднеквадратичное отклонение составляет 57,983. Рассчитанный критерий  $\chi^2$  для ошибки менее 5 % с вероятностью, большей 95 %, равен 5,55. Согласно табличным значениям критерия, это допустимо, поэтому считаем полученные формулы адекватными.

Интерес представляет аналитическая формула для определения общего перепада давления на двухслойном фильтре со связанной структурой.

В качестве модельного фильтра использовали цилиндрический фильтр, в котором первый слой – волокнистый (стеклоткань), а второй – металлокерамика. Фильтры представленного типа используются для тонкой очистки потоков, в которых размер частиц пыли менее 5 мкм. В этих условиях фильтрование осуществляется за счёт закупоривания каналов («пор») фильтровального слоя. Однако и в этом случае размер каналов волокнистого слоя больше, чем металлокерамического, поэтому в волокнистом слое оседают более крупные частицы. При полном забивании данный слой может быть легко заменён другим, а ресурс дорогостоящей металлокерамики будет значительно увеличен. Выражение для расчёта перепада давления на двухслойном фильтре с учётом установленного механизма фильтрования будет следующим [1; 4]:

$$\Delta P_{\text{общ}} = \Delta P_{\text{МК}} + \Delta P_{\text{СТ}} \quad (20)$$

В данном выражении  $\Delta P_{\text{МК}}$ ,  $\Delta P_{\text{СТ}}$ , – общий перепад давления на слое пористой металлокерамики и стеклоткани соответственно, Па.

Для определения общего перепада давления на волокнистых слоях используем известную формулу (6).

Были изучены расчётные зависимости, наиболее адекватно отвечающие фильтрованию через определённые виды фильтровальных слоёв из тканевых материалов [3].

Для данного слоя гидравлическое сопротивление с учётом критерия Рейнольдса рассчитывается по выражению

$$\lambda = \frac{133}{Re} + 2,34. \quad (21)$$

Зная специфику процесса фильтрования, можно сказать, что пористость фильтровального слоя  $\varepsilon$  меняется по такой же закономерности, что и коэффициент проскока  $K$  [1]. Можем использовать следующее выражение:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{н}} e^{-m\tau}. \quad (22)$$

С учётом формулы (22) выражение (20) выглядит следующим образом:

$$\lambda = \frac{399(1 - \varepsilon_{\text{н}} e^{-m_{\text{н}}\tau})\mu}{2\Phi_{\text{в}}\omega d_{\text{эв}}\rho} + 2,34, \quad (23)$$

где  $\varepsilon_{\text{н}}$  – первоначальная начальная пористость волокнистого слоя, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $m_{\text{н}}$  – эмпирический коэффициент пропорциональности;  $\Phi_{\text{в}}$  – фактор формы для волокна;  $\omega$  – скорость пылегазового потока;  $d_{\text{эв}}$  – эквивалентный диаметр порового пространства волокнистого слоя, м;  $\rho$  – плотность пылевоздушной смеси, кг/м<sup>3</sup>.

После преобразований получаем зависимость для определения перепада давления на волокнистом слое:

$$\Delta P_{\text{ст}} = \left( \frac{399(1 - \varepsilon_{\text{н}} e^{-m_{\text{н}}\tau})\mu}{2\Phi_{\text{в}}\omega d_{\text{эв}}\rho} + 2,34 \right) \left( \frac{3(1 - \varepsilon_{\text{н}} e^{-m_{\text{н}}\tau})l\rho\omega^2}{4\varepsilon_{\text{н}} e^{-m_{\text{н}}\tau}\Phi_{\text{в}} d_{\text{эв}}} \right). \quad (24)$$

Для характеристики общего перепада давления в порах зернистого слоя используем выражение [1]

$$\Delta P_{\text{МК}} = \left[ \left( \frac{1}{\Delta P_{\text{н}}} \right)^{1/2} - \left( \frac{x_{\text{н}}}{\pi l} \right) \left( \frac{wB}{N_{\text{н}}} \right)^{1/2} \left[ \tau - \left( \left( \frac{K_{\text{н}}}{m} \right) (1 - e^{-m\tau}) \right) \right] \right]^{-2}. \quad (25)$$

С учётом того, что  $N_{\text{н}}$  – количество пор в слое  $B$ , рассчитываем по формуле  $B = \pi / 8\mu l$ , где  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;  $l$  – высота фильтровального слоя, м.

Существуют отработанные методики для расчёта параметров фильтрующих элементов, однако параметры пылей определяют экспериментально.

Коэффициент пропорциональности  $m$  формулы (25) делим на два множителя: первый отражает свойства фильтрующего материала, второй – фильтруемой пыли. Целесообразно разделить данный коэффициент  $m$  в уравнении (24) на два множителя, один из которых определяет влияние на перепад давления структуры фильтровального материала  $m_{\text{в}}$ , другой – свойств пыли  $m_{\text{н}}$ .

$$\Delta P_{\text{МК}} = \left[ \left( \frac{1}{\Delta P_{\text{н}}} \right)^{1/2} - m_{\text{н}} \left( \frac{w}{\mu(H-l)N} \right)^{1/2} \tau \right]^{-2}. \quad (26)$$

Начальный перепад давления  $\Delta P_{\text{н}}$  представляет собой перепад давления на стеклотканевом слое, так как процесс идёт сразу с закупориванием каналов данного слоя:

$$\Delta P_{\text{н}} = \lambda \left[ \mu(1 - \varepsilon')^2 w(H-l) \right] / \varepsilon'^3 \Phi^2 d_s^2. \quad (27)$$

В выражении (27)  $\Phi$  – коэффициент формы зерна;  $\varepsilon'$  – пористость зернистого слоя, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Уравнение (26) после подстановок и преобразования имеет вид

$$\Delta P_{3.c} = \left[ \left\{ \left( \frac{399(1-\varepsilon_3)^2 \mu}{0,846\varepsilon_3^{1,25} w \rho d_3} + 2,34 \right) \cdot \left( \frac{3(1-\varepsilon_3)^2 (H-l) \rho w^2}{1,692\varepsilon_3^{2,25} \Phi_3 d_3} \right) \right\}^{-1/2} - m_n \left( \frac{w}{\mu(H-l)N} \right)^{1/2} \tau \right]^{-2}. \quad (28)$$

Таким образом, общий перепад давления на двухслойном комбинированном фильтре при невысокой концентрации высокодисперсной пыли можно рассчитать, используя аналитические выражения (25) и (28).

Общее уравнение для двух слоёв будет иметь вид

$$\Delta P_{\text{общ}} = \left( \frac{399(1-\varepsilon_b e^{-m_b \tau}) \mu}{2\Phi_b w d_{\text{эв}} \rho} + 2,34 \right) \left( \frac{3(1-\varepsilon_b e^{-m_b \tau}) l \rho w^2}{4\varepsilon_b e^{-m_b \tau} \Phi_b d_{\text{эв}}} \right) + \left[ \left\{ \left( \frac{399(1-\varepsilon_3)^2 \mu}{0,846\varepsilon_3^{1,25} w \rho d_3} + 2,34 \right) \cdot \left( \frac{3(1-\varepsilon_3)^2 (H-l) \rho w^2}{1,692\varepsilon_3^{2,25} \Phi_3 d_3} \right) \right\}^{-1/2} - m_n \left( \frac{w}{\mu(H-l)N} \right)^{1/2} \tau \right]^{-2}. \quad (29)$$

В представленном выражении присутствуют коэффициенты  $m_b$  и  $m_n$ , которые отражают свойства волокнистого слоя и свойства пыли. Для модельного фильтра, использованного в экспериментах,  $m_b = 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $m_n = 9 \cdot 10^{-8} \cdot \text{с}^{-1}$ . Отклонение расчётных и экспериментальных значений при определении  $\Delta P_{\text{общ}}$  по аналитической формуле не превышало 8...10 % от эмпирических данных. Расхождение представленных результатов объясняется погрешностями измерений исходных данных.

На основании полученных зависимостей были разработаны программные продукты для ЭВМ на Visual Basic for Application, упрощающие расчёты [5].

### Заключение

Были предложены расчётные формулы для определения общего перепада давления на комбинированных фильтровальных перегородках со связанной и несвязанной структурами. Полученные по аналитическим формулам данные согласуются с экспериментальными. Предложенные формулы позволяют прогнозировать перепад давления на фильтрах и с учётом его разрабатывать высокоэффективные режимы эксплуатации и алгоритмы управления системой аспирации в автоматизированном режиме.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химических технологий / А. Г. Касаткин. – М.: ООО ИД «Альянс», 2006. – 753 с.
2. Красовицкий, Ю. В. Обеспыливание газов зернистыми слоями / Ю. В. Красовицкий, В. В. Дуров. – М.: Химия, 1991. – 192 с.
3. Панов, С. Ю. Модернизация фильтров для обеспыливания аспирационных выбросов зерноперерабатывающих предприятий / С. Ю. Панов // Вестник ВГУИТ. – 2012. – № 1. – С. 22-26.
4. Пат. 2017614784 Российская Федерация, МПК. Расчёт основных параметров зернистых фильтров / Е. В. Романюк, Е. Л. Заславский, А. В. Федоров, Д. В. Поляков. – № 2017614784; заявл. 31.01.17; опубл. 27.04.17.
5. Многоцелевые зернистые фильтры-пылеуловители для очистки технологических газов и аспирационных выбросов / И. А. Чугунова, Ю. В. Красовицкий, Н. Н. Лобачева, М. Н. Федорова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2010. – № 1. – С. 163-167.
6. Aerodynamische Verfahren zur Erhöhung der Leistungserzeugung der Entstaubung, Monographie / Y. V. Kravovickij, P. Baltrėnas, B. G. Kolbeschkin [and other]. – Vilnius: Technika, 2006. – 352 p.

Иванов С. Н., Сарилов М. Ю., Просолович А. А., Решетник У. Е.  
РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРИВОДА ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ  
ЛОКАЛИЗАЦИИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

**Иванов С. Н., Сарилов М. Ю., Просолович А. А., Решетник У. Е.**  
**S. N. Ivanov, M. Y. Sarilov, A. A. Prosolovich, U. E. Reshetnik**

## **РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРИВОДА ЗАПОРНОЙ АРМАТУРЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА**

### **DESIGN AND MODELING OF THE AUTOMATIC DRIVE OF THE LOCK VALVE LOCALIZATION OF A CENTRIFUGAL PUMP**

**Иванов Сергей Николаевич** – доктор технических наук, доцент, 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.

**Mr. Sergey N. Ivanov** – Dr. habil. in, professor, Electrical Engineering Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: Ivanov.sn@email.knastu.ru.

**Сарилов Михаил Юрьевич** – доктор технических наук, профессор кафедры машин и аппаратов химических производств Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: sarilov@knastu.ru.

**Mr. Mikhail Y. Sarilov** – Dr. habil. in Engineering, Head of Machinery and Equipment of Chemical Industry Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: sarilov@knastu.ru.

**Просолович Алексей Александрович** – кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел.: + 7 (914) 185-93-59. E-mail: office@knastu.ru.

**Mr. Alexey A. Prosolovich** – PhD in Engineering, Associate Professor, Computer-aided design systems Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel.: + 7 (914) 185-93-59. E-mail: office@knastu.ru.

**Решетник Ульяна Евгеньевна** – магистр кафедры машин и аппаратов химических производств Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел.: + 7 (914) 185-65-41. E-mail: Reshetnik@gmail.com.

**Ms. Ulyana E. Reshetnik** – master's degree student, Machinery and Equipment of Chemical Industry Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel.: + 7 (914) 185-65-41. E-mail: Reshetnik@gmail.com.

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы разработки и моделирования автоматического привода запорной арматуры локализации центробежного насоса, используемого в технологическом процессе транспортирования углеводородных носителей. Приведены основные достоинства приводов на базе электромеханических преобразователей переменного тока. Показан алгоритм моделирования с использованием программного комплекса T-Flex. Рассмотрена физическая реализация преобразователя и приведены рекомендации по его проектированию. Обоснованы критерии работоспособности применительно к объекту исследования. Показано, что синтез привода и его системы управления может быть проведен на основе известных в машиностроении и теории управления подходов. Повышение эффективности и надёжности привода обеспечивается интеграцией исполнительного устройства непосредственно в приводной механизм. Приведены результаты моделирования и проектирования базовых элементов привода, адаптирована машиностроительная методика оценки надёжности исполнительного элемента привода, предназначенного для использования в качестве автоматизированного механизма возвратно-поступательного перемещения оборудования транспортного назначения.

**Summary.** The article deals with the design and modeling of the automatic drive of the lock valve localization of a centrifugal pump used in the technological process of transportation of hydrocarbon carriers. The main advantages of the drives on the basis of electromechanical converters of alternating current are provided. The algo-



rithm of modeling using t-Flex software complex is shown. The physical implementation of the Converter is considered and recommendations for its design are given. The criteria of efficiency in relation to the object of study are grounded. It is shown that the synthesis of the drive and its control system can be carried out on the basis of approaches well-known in machine-building and control theory. Efficiency and reliability improvement of the drive is provided by the actuator integration directly into the water mechanism. The results of modeling and design of the basic elements of the drive are presented, the engineering technique of assessing the reliability of the executive element of the drive intended for use as an automated mechanism of reciprocating movement of transport equipment is adapted.

**Ключевые слова:** проектирование, моделирование, центробежный насос, работоспособность, автоматический привод.

**Key words:** design, simulation, centrifugal pump, operability, automatic drive.

УДК 621.3.019

### Введение

Транспортирование вязких жидкостей традиционно осуществляется по трубопроводным магистралям с помощью насосных установок центробежного типа. Теоретически поток перекачиваемой жидкости характеризуется объёмным расходом и средней по сечению трубы скоростью. Расход является одной из основных характеристик потоков жидкости и определяется количеством жидкости, которое перемещается через поперечное сечение трубопровода в единицу времени. При движении реальных жидкостей часть механической энергии движения необратимо превращается в тепловую. Эта часть энергии в традиционных устройствах называется потерями энергии, обусловленными вязкостью жидкости. Часть мощности, затрачиваемая насосом на транспортирование вязкой жидкости, компенсирует потери энергии, связанные с потерей давления и потерей напора. При этом гидравлические потери давления (напора) делят на потери давления на трение при движении жидкости, равномерно распределённой по всей длине трубы, и местные потери, сосредоточенные на сравнительно коротких участках трубопроводов, обусловленных местными изменениями формы канала. Типичными примерами местных сопротивлений являются участки резкого расширения (диффузоры) и сужения (конфузоры) трубопровода, места слияния и разделения потоков, трубопроводная аппаратура (вентили, клапаны, задвижки, дроссели и т. п.). Характерной особенностью движения жидкости через местные сопротивления является образование вихрей в потоке, что вызывает значительные потери энергии (давления, напора).

Анализ состава энергетического оборудования, обеспечивающего технологический процесс транспортирования нефтепродуктов, показывает, что одним из самых энергоёмких видов оборудования являются насосные агрегаты, состоящие из центробежного насоса и электродвигателя, причём единичная мощность применяемых для привода насосов электродвигателей находится в диапазоне 5,5...1250 кВт и соответственно определяет мощность и стоимость всего агрегата. Практика эксплуатации насосных установок показывает, что по ряду причин (высокое использование, неравномерный график нагрузки, разброс параметров транспортируемой жидкости и т. д.) это оборудование характеризуется повышенным индексом технического риска.

В этой связи задача обеспечения экономичной и надёжной транспортировки углеводородных носителей актуальна не только при разработке новых удалённых мест добычи, но и при модернизации существующих магистралей. Одним из направлений повышения эксплуатационных характеристик таких объектов является создание и разработка новых эффективных устройств, обеспечивающих автономность их технического сопровождения.

В качестве таких устройств, позволяющих автоматизировать процессы вывода насосного оборудования из технологического цикла для ремонта, профилактики или замены, можно рассматривать высоконадёжные интеллектуальные привода на основе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Это связано с такими возможностями привода, как

- получение тяговых усилий, ограниченных только прочностью запорной арматуры;

- уникальные регулировочные характеристики (возможность обеспечения и точного поддержания линейной скорости запорного элемента в диапазоне 0,001...10 м/с);
- повышение коэффициента полезного действия и эффективности оборудования в целом при эксплуатации и техническом обслуживании;
- принципиальное улучшение массогабаритных и стоимостных показателей;
- возможность дистанционного автоматического управления для труднодоступного и удалённого оборудования.

Основой разработки являются результаты реализации опытного образца в качестве привода автоматизированной системы комплексной безопасности [1]. Полученные при этом практические результаты подтвердили целесообразность и перспективность использования разработки в качестве силового привода с гарантированными показателями безотказности и работоспособности.

Важно отметить, что устройство может адаптироваться под экстремальные внешние воздействия в зависимости от условий эксплуатации. В разработке реализован принцип электромагнитного преобразования электрической энергии в управляемое линейное перемещение исполнительного механизма. Теоретически устройство может быть использовано в качестве элементов гидросооружений, на транспортных объектах, в строительном и технологическом оборудовании и т. п.

### **Описание научно-практической проблемы**

Проектирование и моделирование автоматического привода (АП) при недетерминированном графике нагрузки представляет сложную научную задачу, требующую одновременного учёта динамики системных электромагнитных, механических, гидравлических и тепловых процессов. Для определения диапазона выполнимости АП и исключения энергетической избыточности целесообразно использование современных методов планирования эксперимента и проектирования с привлечением интегрированных САД- и САЕ-систем, являющихся универсальным средством вариативного проектирования и многофакторной оптимизации сложных физических процессов [2 – 4].

Использование САПР предполагает разработку геометрии и создание сборочной модели АП. Это требует обоснования компоновки, выбора расчётных моделей для вычислительного эксперимента САЕ-методами. На начальном этапе проектирования при большом числе или отсутствии адекватной информации о влиянии отдельных параметров целесообразно использование методов планирования эксперимента. Нахождение субоптимального варианта требует исследования различных вариантов автоматического привода и, соответственно, обеспечения возможности варьируемой геометрической модели.

### **Моделирование привода**

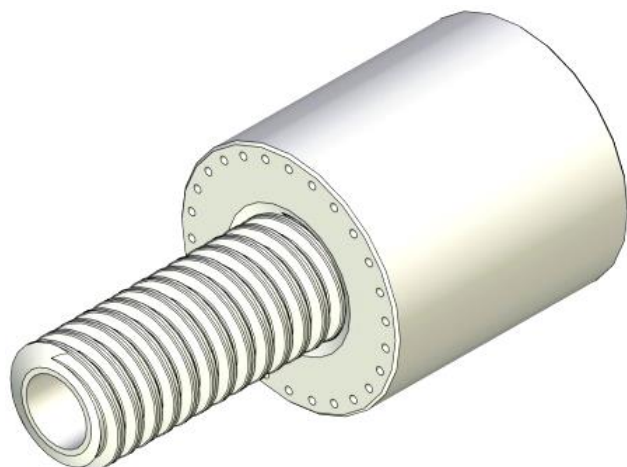
Общая структурная схема автоматического привода рассмотрена в работе [1]. Формально разработка параметрической модели вращающейся части привода необязательна, так как она стандартизована, унифицирована и соответствует габариту базового асинхронного двигателя. По справочным данным [5], находятся размерные соотношения базовых элементов длина  $l$  привода и диаметр  $d$ , которые определяют область проектирования. Базовой деталью привода является тело вращения «Корпус». Геометрическая 3D-модель «Корпус» выполнена с использованием САПР T-Flex CAD («Топ-Системы», г. Москва).

Объект компьютерного проектирования – параметрическая сборочная 3D-модель привода. В базовой детали «Корпус» позиционируется сборочная единица «Тяга», которая изображена на рис. 1, а.

Для оценки расположения поверхностей и формы элементов АП, проверки конструктивной совместимости, определения эргономических свойств методом послойного синтеза на 3D-принтере Dimension 3D Printers from Stratasys из пластика изготовлена модель базовых элементов АП, приведённая на рис. 1, б.

Физическая реализация АП показана на рис. 2.

а)



б)



Рис. 1. Модели привода:  
а – компьютерная; б – прототипированная



Рис. 2. Физическая реализация привода

### Исследование надёжности привода

Анализ результатов исследования механических передач показывает, что если на тягу ( $l \leq 0,5$  м) действует сжимающая или растягивающая нагрузка, превышающая 25 кН, то основной критерий работоспособности – это скорость износа резьбового соединения [6]. Поэтому целью проверочного расчёта является проверка соответствия этого критерия допустимым значениям.

Исходные данные для расчёта:

$L$  – осевое перемещение тяги;

$Q_{\text{макс}}$  – наибольшая осевая нагрузка;

$v$  – линейная осевая скорость тяги относительно корпуса;

$\omega_b$  – частота вращения ротора.

Основное влияние на скорость изнашивания элементов передачи оказывает давление удельное  $q$ .

Расчётное значение не должно превышать допустимой величины  $[q]$ :

$$q = \frac{Q_n}{A_n} \leq [q],$$

где  $Q_n$  – нормальное изгибное усилие;  $A_n$  – теоретическая площадь сопряжения взаимно перемещающихся элементов.

Давление равномерно распределённой по виткам нагрузки составит:

$$\frac{Q_n}{A_n} = \frac{Q}{z \cdot A},$$

где  $Q$  – осевая сила тяги, Н;  $A$  – проекция площади рабочей поверхности витка на плоскость, перпендикулярную оси тяги;  $z$  – рабочее число витков.

Условием износостойкости является выражение

$$q = \frac{Q}{z \cdot \pi \cdot d_2 \cdot H_1} \leq [q],$$

где  $d_2$  – средний диаметр резьбы;  $H_1$  – рабочая высота профиля;  $[q]$  – нормативное давление, МПа.

Это выражение содержит три проектных параметра и имеет несколько решений. При приближённых расчётах принимают:

- относительную глубину  $\psi_h = H_1 / p$  (трапецеидальные резьбы  $\psi_h = 0,5$ , упорные –  $\psi_h = 0,75$ );  $\psi_H$  предварительно принимается в пределах  $1,2 \dots 2,5$ ; большее значение принимается для силового привода;

- приведённую высоту ротора  $\psi_h = H_p / d_2$ ,  $H_p$  – высота ротора.

Полная высота резьбовой части ротора  $H_p = z \cdot P$ , где  $P$  – шаг резьбы. Средний диаметр резьбы  $d_2 \geq \sqrt{\frac{Q}{\pi \cdot \psi_h \cdot \psi_H \cdot [q]}}$ .

Последующий расчёт включает выбор материалов резьбовой части ротора и тяги; нахождение нормированного давления  $[q]$  и допускаемых напряжений; относительной глубины резьбы  $\psi_h$ , относительной высоты ротора  $\psi_H$ ; среднего диаметра резьбы.

При сжимающей тягу осевой силе  $Q$  проверяется продольная устойчивость на изгиб. Гибкость тяги рассчитывается по выражению  $\lambda = \frac{4 \cdot \mu \cdot L}{d_3}$ , где  $\mu$  – коэффициент, учитывающий способ закрепления опор (шарнирные опоры  $\mu = 1$ ).

Критическое напряжение гибкости  $\lambda_1$  соответствует потери устойчивости и равно пределу пропорциональности.

По формуле Эйлера расчёт на устойчивость ведётся для критической силы, если  $\lambda > \lambda_1$ :

$$Q_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(\mu \cdot L)^2},$$

где  $E$  – модуль упругости материала тяги;  $I = \pi \cdot d_3^4 / 64$  – момент инерции в поперечном направлении сопряжения.

Расчёт на устойчивость ведётся для критической силы при  $\lambda < \lambda_1$  ведётся по формуле

$$Q_{кр} = \frac{\pi \cdot d_3^4}{4} \cdot (a - b \cdot \lambda),$$

где  $a$  и  $b$  – экспериментальные коэффициенты. Требуемый коэффициент запаса устойчивости  $s_y$  должен быть не ниже детерминированного  $[s_y]$ :

$$s_y = \frac{Q_{кр}}{Q} \geq [s_y].$$

Рекомендуемое значение  $[s_y] = 3 \div 4$ .

При заданных частоте вращения ( $\omega_b$ ) и осевой скорости тяги ( $v$ ) число заходов резьбы рассчитывается по формуле  $n = \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{\omega \cdot P}$ .

Для расчёта угла подъёма резьбы используется выражение  $\psi = \arctg \frac{P_h}{\pi \cdot d^2}$ , где величина хода  $P_h$  определяется произведением числа заходов на шаг.

С учётом угла профиля приведённый к расчётным условиям коэффициент трения в резьбе определяется по формуле  $f' = \frac{f}{\cos \alpha / 2}$ , где  $f$  – коэффициент трения материалов;  $\alpha$  – угол профиля.

Приведённый к расчётным условиям угол трения  $\rho' = \arctg f'$ .

Момент трения  $M_p$  обусловлен действующей осевой силой и зависит от конструктивного исполнения опоры.

Если наружный и внутренний диаметры  $D_0$  и  $d_0$ , для кольцевой опоры момент трения составит  $M_{оп} = \frac{1}{3} \cdot Q \cdot f \cdot \frac{D_0^3 - d_0^3}{D_0^2 - d_0^2}$ , где  $f$  – коэффициент трения на поверхности.

На кручение устойчивость тяги проверяется при одновременном действии напряжений растяжения и сжатия исходя их значения  $\sigma_3 = \sqrt{\left(\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_3^2}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{M}{0,2 \cdot d_3^3}\right)^2} \leq [\sigma]_{p(сж)}$ , где  $M$  – тангенциальный крутящий момент;  $[\sigma]_{p(сж)}$  – нормируемое при растяжении (сжатии) напряжение.

Условие отсутствия среза резьбы проверяется по выражению  $\tau_{ср} = \frac{Q}{\pi \cdot d \cdot z \cdot b} \leq [\tau]_{ср}$ , где  $b$  – для упорной резьбы  $0,736P$ ; для трапецеидальной  $0,634P$ ;  $[\tau]_{ср}$  – допускаемое напряжение.

Допускаемые для материала напряжения резьбовой части ротора назначаются по машиностроительным рекомендациям, приведённым в работе [7].

В качестве дополнительного критерия работоспособности устойчивость при продольном изгибе может быть принята, если приведённая длина тяги выше 0,7 м или сжимающие осевые усилия не превышают  $15 \div 20$  кН.

#### Модель объекта управления

Процесс автоматической локализации насосного агрегата из технологического цикла комплекса для транспортировки обеспечивает система управления с использованием интеллектуальных подходов, реализация которой наиболее целесообразна в виде базы знаний  $\{u, x\}$ , обеспечивающей возможность учёта управляющих параметров и внешних случайных возмущений.

Анализ используемых подходов показывает, что для АП необходим учёт трёх управляемых параметров (тяговое усилие, линейная скорость перемещения тяги, давление транспортируемого носителя), приводящий к построению базы знаний в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} x_1, x_2, x_3 = f(u_1) \\ x_1, x_2, x_3 = f(u_2) \end{cases} \quad (1)$$

где  $x_1, x_2, x_3$  – выходные параметры;  $u_1, u_2$  – управляющие параметры.

Если требования к системе управления относительно невысоки, то количество перекрещивающихся связей между выходными параметрами может быть уменьшено заменой одного из них через остальные параметры. В общем случае система уравнений (1) приводится к виду

$$\begin{cases} x_1(x_2, x_3), x_2(x_1, x_3), x_3(x_1, x_2) = f(u_1) \\ x_1(x_2, x_3), x_2(x_1, x_3), x_3(x_1, x_2) = f(u_2) \end{cases}$$

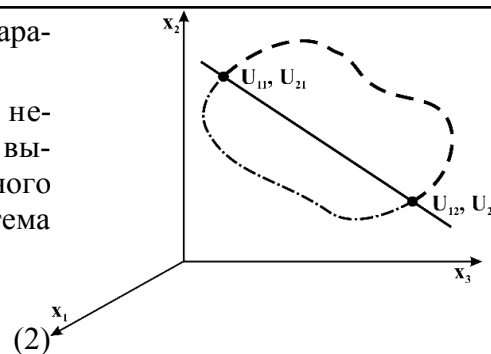


Рис. 3. К определению траектории управления

На рис. 3 условно показаны возможные траектории управления, определяемые входными параметрами  $u_{11}, u_{21}$  и  $u_{12}, u_{22}$ , обеспечивающие требуемые выходные параметры  $x_1, x_2, x_3$  (тяговые усилия и линейные скорости, являющиеся выходными параметрами АП).

### Заключение

Результаты разработки и моделирования автоматического привода, предназначенного для запорной арматуры локализации центробежного насоса, полученные с использованием компьютерных 3D-технологий, показывают целесообразность его применения в качестве перспективного энергетического оборудования.

Приведённая методика расчёта критериев работоспособности позволяет производить оценку основных показателей надёжности и долговечности привода. Полученные результаты являются основой для создания различных видов транспортного и промышленного силового оборудования, использующего прецизионные механизмы линейного перемещения и позиционирования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2651531 С1 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> В61L 29/04. Автоматизированная пропускная система / С. Н. Иванов, Ю. С. Иванов, С. Г. Баена, О. С. Амосов; заявитель и патентообладатель Комсомольский-на-Амуре гос. техн. ун-т. – № 2017113804; заявл. 20.04.2017; опубл. 19.04.2018. Бюл. № 11. – 2 с.
2. Большаков, В. П. 3D-моделирование в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex: учебный курс / В. П. Большаков, А. Л. Бочков, А. А. Сергеев. – СПб.: Питер, 2011. – 336 с.
3. Алямовский, А. А. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи / А. А. Алямовский. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 448 с.
4. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов [и др.]. – СПб.: БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.
5. Копылов, И. П. Справочник по электрическим машинам / И. П. Копылов, Б. К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 1-2.
6. Иванов, М. Н. Детали машин / М. Н. Иванов, В. А. Финогенов. – М.: Высш. шк, 2008. – 408 с.
7. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя / В. И. Анурьев. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 1-3.

Верещагина А. С., Харитонов А. А.  
A. S. Vereshchagina, A. A. Kharitonov

## ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА В УСЛОВИЯХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

## WAYS OF INCREASE OF EFFICIENCY OF TECHNOLOGICAL PROCESS IN TERMS OF THE ENGINEERING ENTERPRISE

**Верещагина Александра Сергеевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения Новосибирского государственного технического университета (Россия, Новосибирск); 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20; тел.: + 7 (913) 469-43-37. E-mail: vereshhagina@corp.nstu.ru.

**Ms. Alexandra S. Vereshchagina** – PhD in Engineering, Assistant Professor, Mechanical Engineering Department, Novosibirsk State Technical University (Russia, Novosibirsk); 630073, Novosibirsk, 20 K. Marks str.; tel.: +7 (913) 469-43-37. E-mail: vereshhagina@corp.nstu.ru.

**Харитонов Андрей Александрович** – магистрант кафедры технологии машиностроения Новосибирского государственного технического университета (Россия, Новосибирск); 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20; тел.: + 7 (983) 127-96-68. E-mail: andrey.hharitonov@yandex.ru.

**Mr. Andrey A. Kharitonov** – Master's degree student of the department of Engineering Technology Novosibirsk State Technical University (Russia, Novosibirsk); 630073, Novosibirsk, 20 K. Marks str.; tel.: + 7 (983) 127-96-68. E-mail: andrey.hharitonov@yandex.ru.

**Аннотация.** В статье затронуты актуальные вопросы технологии машиностроения, посвящённые разработке технологического процесса изготовления детали «Корпус». Рассмотрены концептуальные направления совершенствования технологического процесса, основанные на выборе режущего высокопроизводительного инструмента, а также применения САМ-систем для разработки управляющих программ.

**Summary.** The article touches upon topical issues of engineering technology, dedicated to the development of the technological process of manufacturing the «Case» part. The conceptual directions of the technological process improvement, based on the choice of cutting high-performance tools, as well as the use of CAM systems for the development of control programs are considered.

**Ключевые слова:** выбор режущего инструмента, технологический процесс.

**Key words:** choice of cutting tool, technological process.

УДК 621.1

### Введение

В настоящее время рентабельность предприятий, выпускающих конкурентоспособную продукцию, определяется качеством производственных процессов, оптимальной структурой производственного цикла и эффективным взаимодействием структурных подразделений. Из всей совокупности производственных процессов наиболее значимое влияние на эффективность машиностроительного предприятия оказывает технологический процесс производства продукции.

Качество технологического процесса зависит от факторов, представленных на рис. 1.

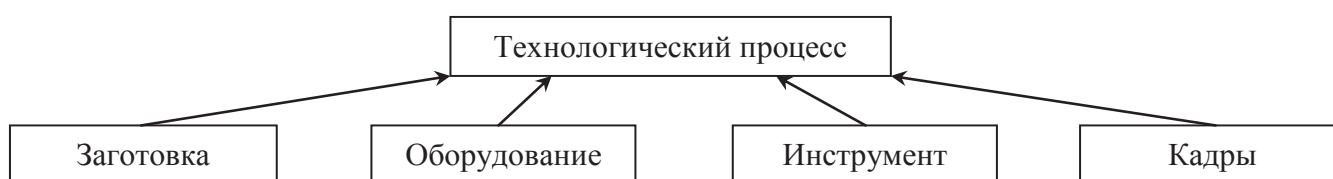


Рис. 1. Факторы, влияющие на технологический процесс

Каждый из представленных факторов по-разному влияет на технологический процесс изготовления детали. Рассмотрим влияние данных факторов по отдельности.

#### **Обсуждение полученных результатов. Концепция выбора заготовки**

Одним из основных факторов повышения эффективности технологического процесса является метод получения заготовки (МПЗ). При выборе МПЗ важно учитывать объёмы выпуска продукции, материал детали и её геометрию. На сегодняшний день существует множество различных МПЗ – от традиционных, таких как литьё, до современных методов, основанных на применении аддитивных технологий.

Рассмотрим технологический процесс производства детали «Корпус» с годовым объёмом выпуска, составляющим 5000 штук, 3D-модель которой представлена на рис. 2.

Масса детали 4,9 кг. Корпусные детали предназначены для размещения в них деталей и сборочных единиц. Они должны обладать достаточной жёсткостью, необходимой для обеспечения точности относительного положения деталей и сборочных единиц.

Материалом для изготовления детали «Корпус» является сплав Д16. В настоящее время заготовка представляет собой прокат  $\varnothing 250 \times 155$  мм массой 21,68 кг. Для улучшения технологического процесса предлагается заменить метод получения заготовки для детали «Корпус» из проката Д16 на литьё под давлением из материала АЛ2, который соответствует физико-механическим свойствам и существенно не оказывает влияния на эксплуатационные показатели и характеристики детали. Данный метод обеспечит приближённую к готовой детали геометрию заготовки, а также требуемые механические свойства (см. рис. 3).

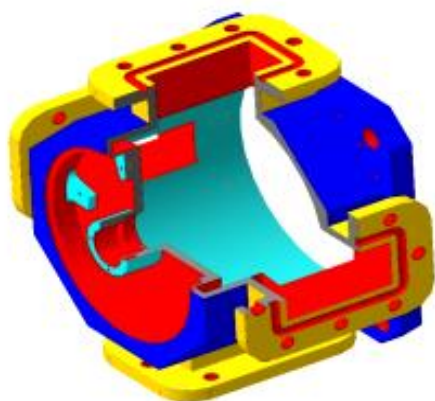


Рис. 2. Виртуальная модель детали «Корпус»

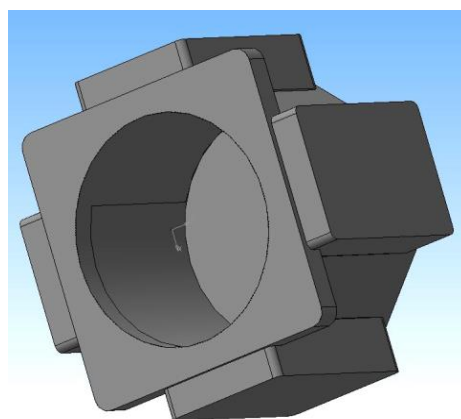


Рис. 3. Расчёт массы заготовки в программе КОМПАС V16

Согласно расчёту программы КОМПАС V16, применение метода литья под давлением позволит сократить массу заготовки более чем в 2 раза, причём масса заготовки составляет не более 10 кг (см. рис. 4).

Свойство	Значение	Единица измерен...
Обозначение		-
Наименование	Деталь	-
Масса	8.0161	кг

Рис. 4. Расчёт массы заготовки в программе КОМПАС V16

Стоимость изготовления заготовки приведена в табл. 1.

Таблица 1

Стоимость изготовления заготовки

Показатель	Существующий технологический процесс	Альтернативный технологический процесс
Стоимость материала, р./т	85 000	100 000
Затраты на механическую обработку, р.	8550	1550
Затраты на производство заготовки, р.	10 174	2738
Экономический эффект, р.	37 180 000	

Примерная стоимость штампа данного типа материала и производственной программы составляет около 8 млн рублей.

**Концепция выбора режущего инструмента**

Для повышения эффективности технологического процесса при производстве детали «Корпус» во время выполнения операции торцевого фрезерования предполагается заменить фрезу 2214-0501, применяемую на фрезерной операции 075, альтернативной насадной фрезой Garant 222403 40/4 со сменными пластинами, которая изображена на рис. 5.



Рис. 5. Высокопроизводительная фреза насадная фирмы Garant

Сравнительные характеристики фрез представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнение характеристик фрез

Характеристики	Фреза 2214-0501	Фреза Garant 222403 40/4
Материал фрезы	Твёрдый сплав	Твёрдый сплав
Рекомендуемые режимы резания материала Д16	140 м/мин	250 м/мин
Стойкость, мин	120	240
Стоимость, р.	6435	36 666

Применение фрезы Garant позволяет в перспективе снизить не только затраты на инструмент, но и повысить производительность и качество обработки. В дальнейшем будут заменяться только пластины, которые намного дешевле самой державки. Пластины можно переворачивать (см. рис. 6) и использовать новые кромки для механической обработки, тем самым усиливая стойкость инструмента в 4 раза (T = 960 мин).

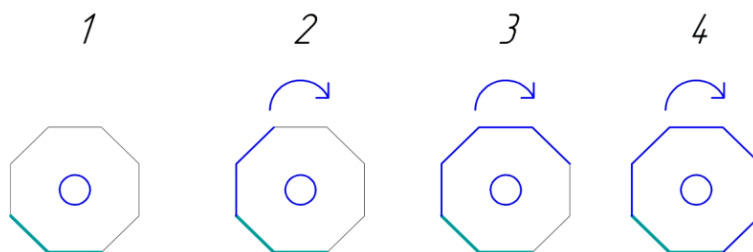


Рис. 6. Использование ресурса пластин

### Концепция оптимизации технологического процесса

Любой технологический процесс на современном производстве или предприятии начинается с выбора и изготовления заготовки. Выбор заготовки – трудоёмкое дело, требующее от инженера-технолога обдуманного и взвешенного решения.

В существующем технологическом процессе используется заготовка из алюминиевого проката марки Д16. Поскольку данный материал неприменим при литье, то было принято решение о его замене литейным аналогом Ал 2. В итоге экономический эффект при изменении метода получения заготовки составил более 30 млн рублей (см. табл. 1). Данный факт говорит об улучшении и оптимизации технологического процесса на предприятии.

Ещё одной важной составляющей любого технологического процесса является инструментальное обеспечение. Анализ имеющегося инструмента позволяет провести оптимизацию и заменить его инструментами ведущих производителей. Так, в 085-й операции сверло 2301-3607 (ГОСТ 10903-77 «Свёрла спиральные с коническим хвостовиком. Основные размеры») было заменено сверлом 116340 Ø16 (см. рис. 7). Данное сверло позволяет работать на более высоких скоростях, чем ГОСТ-инструмент, что уменьшает время обработки в несколько раз, а также производитель заявляет, что стойкость инструмента составляет 90 мин и что это в 2 раза больше по сравнению с ГОСТ-инструментом.



Рис. 7. Высокопроизводительное сверло фирмы Garant

Немаловажным является и станочное оборудование, с помощью которого выполняются основные работы в технологическом процессе. Анализ применяемых при изготовлении данного изделия станков позволил произвести целесообразную замену некоторых моделей. Например, станок 16K20, применяемый на предварительных операциях перед обработкой на станках с ЧПУ, обладающий низкой ремонтпригодностью, экономически целесообразно будет заменить альтернативным токарно-винторезным станком TRENS SN 50C. Станок TRENS SN 50C характеризуется более высоким качеством изготовления, повышенной точностью, высокой жёсткостью и стабильностью показателей по сравнению со станком 16K20.

В результате развития машиностроения всё чаще в технологических процессах используют станки с числовым программным управлением. С помощью их функций можно обрабатывать детали различной сложности, решать большое количество задач на предприятии, связанных с механической обработкой. Это касается времени на обработку, сложности обрабатываемой поверхности, достигаемой точности и т. д. С помощью станков с числовым программным управлением можно оптимизировать технологический процесс, что позволит повысить производительность, увеличить экономический эффект технологического процесса, повысить качество обработки.

Написание управляющих программ для станков осуществляется с помощью различных программных продуктов. Одним из них является FeatureCAM. Данная программа минимизирует время подготовки управляющих программ для изготовления деталей на фрезерных, токарных и электроэрозионных станках. Программы позволяют визуализировать технологический процесс и произвести его имитацию с помощью специального программного обеспечения, что заранее позволит обнаружить какие-либо ошибки. После отработки программы на компьютере можно отправлять её на станок и обрабатывать «пробную» деталь.

На рис. 8 изображён код управляющей программы.

### **Заключение**

Совершенствование технологического процесса следует проводить комплексно, оно должно включать в себя изменение всей технологической цепочки, начиная от заготовки и заканчивая станочным оборудованием. Улучшением технологического процесса можно более чем в 2 раза повысить производительность процессов, а значит, и рентабельность предприятия.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Верещагина, А. С. Обоснование выбора метода получения заготовки детали «Корпус» / А. С. Верещагина, М. В. Иванова, А. А. Харитонов // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2018. – Т. 5. – № 3, 4. – С. 15-19.
2. Autodesk. Начало работы FeatureCAM-2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://download.autodesk.com/us/support/files/delcam/FeatureCAM/localized/PDF/GettingStarted/FeatureCAM\\_2017\\_GS\\_Russian.pdf](http://download.autodesk.com/us/support/files/delcam/FeatureCAM/localized/PDF/GettingStarted/FeatureCAM_2017_GS_Russian.pdf) (дата обращения: 18.01.2019).
3. Верещагина, А. С. Повышение эффективности технологического процесса путём оптимизации заготовок / А. С. Верещагина, М. В. Иванова, А. А. Харитонов // Наука и инновации XXI века. – 2017. – Т. 1. – С. 116-118.
4. Жуков, К. П. Проектирование деталей и узлов машин: учебник для вузов. / К. П. Жуков, Ю. Е. Гуревич. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2014. – 648 с.
5. Заготовки: понятия, способы получения [Электронный ресурс] / mirznanii.com/Copyright ©-Электрон. Текстовые дан. – 2018. – Режим доступа: <http://mirznanii.com/> (дата обращения: 18.01.2019).
6. Скворцов, В. Ф. Основы технологии машиностроения: учеб. пособие / В. Ф. Скворцов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 350 с.
7. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 1 / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4-е изд. – М.: Машиностроение, 2012. – 656 с.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ  
METALLURGY AND MATERIALS

**Бахматов П. В., Плетнев Н. О.**  
**P. V. Bakhmatov, N. O. Pletnev**

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ТОНКОСТЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩИХ  
СТАЛЕЙ**

**INFLUENCE OF MODES OF LASER WELDING OF THIN-WALLED STRUCTURES  
ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF STAINLESS STEEL  
STEELS'**

**Бахматов Павел Вячеславович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машиностроения и металлургии Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: mim@knastu.ru.  
**Mr. Pavel V. Bakhmatov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of department of the Machine-Building and Metallurgy Department of the Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: mim@knastu.ru.

**Плетнев Никита Олегович** – доцент кафедры машиностроения и металлургии Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.  
**Mr. Nikita O. Pletnev** – associate Professor, Department of mechanical engineering and metallurgy, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.

**Аннотация.** В статье определено влияние формы и параметров единичного импульса на геометрию сварной точки на образцах стали марки 12X18H10T на установке для лазерной сварки BULAT LRS 300. Проведены исследования макро- и микроструктуры сварных соединений, полученных лазерной сваркой; приведены результаты исследований механических свойств сварных соединений.

**Summary.** The article defines the influence of the shape and parameters of a single pulse on the geometry of the welded point on the samples of steel grade 12X18H10T on the installation for laser welding BULAT LRS 300. Studies of macro- and microstructure of welded joints obtained by laser welding have been carried out; the results of studies of mechanical properties of welded joints are presented.

**Ключевые слова:** лазерная импульсная сварка, структура и свойства сварного шва, режимы сварки, форма импульса, размеры сварной точки.

**Key words:** laser pulse welding, structure and properties of the weld, welding modes, pulse shape, spot size.

УДК 621.791.725

**Введение**

С каждым годом набирает тенденцию использование лазерных технологий. Прогрессирующая миниатюризация сварных швов и пропилов особенно востребована при производстве медицинских товаров, мелких деталей автомобильной и электронной техники.

Диапазон лазерного оборудования с непрерывным лучом выхода теперь простирается от компактных приборов мощностью чуть более киловатта до систем мощностью 30 кВт. Подобные установки также доступны для импульсных лазерных систем. Поскольку лазеры на диоксиде углерода больше используются для резки, есть тенденция для сварки применять твердотельные волоконные лазеры. Гибкие системы наведения предполагают серьезные преимущества для программирования сварных швов, и даже программирование трёхмерной сварки теперь стало относительно несложным.

В смысле сварочных технологий не только сложные или крупные детали могут быть проблемой для производителя. Мелкие компоненты особенно трудны для сварки. Поэтому для очень

тонких сварных швов могут использоваться импульсные лазеры, при воздействии которых зоны, подвергаемые воздействию высоких температур, могут быть чрезвычайно малы. Это означает, что можно сваривать заготовки толщиной всего в 50  $\mu\text{m}$ , но только если сварочные края будут оптимизированы и не будет никакого зазора. Лазеру практически нет альтернативы при подготовке кромок, так как с его помощью можно задавать правильные параметры оборудованию и процессу резки, как при точечной сварке. Высокие качества лазера могут использоваться для производства заготовок с нуля.

Технологии быстрого прототипирования позволяют создавать структуры тоньше 100  $\mu\text{m}$ , которые могут использоваться в производстве лекарств, а также для заточки или штамповки инструментов. Кроме того, с их помощью можно в процессе ремонтной сварки для улучшения износостойкости сплава включать твёрдые частицы в его поверхностные слои.

Наряду с повышенной продуктивностью лазера всё большее значение сегодня придают обеспечению безопасности при работе с ним. Разработаны меры активной и пассивной защиты от радиации. Кроме того, предусмотрено отсутствие вредных выбросов, дыма и частиц. Это предъявляет гораздо более высокие требования к системам выхлопа, чем бывает при резных и сварочных работах без использования лазерного оборудования. Поэтому определение влияния режимов лазерной сварки на изменение структуры металла шва, а также влияния на механические свойства является приоритетной задачей в современном сварочном производстве.

Понимание процессов, протекающих в сварочной ванне при импульсном лазерном воздействии, позволит упростить разработку технологических процессов.

#### Методика экспериментального исследования

Известно [1], что наибольшее влияние на геометрию сварной точки (глубину проплавления и ширину) при лазерной сварке оказывает форма лазерного импульса, а для данной модели лазерного устройства данных по её влиянию нет, тогда авторами была разработана методика нанесения «отпечатка импульса на поверхность металла» с применением оргстекла, приставленного к стальной пластине, а луч направлялся в соединение (см. рис. 1).

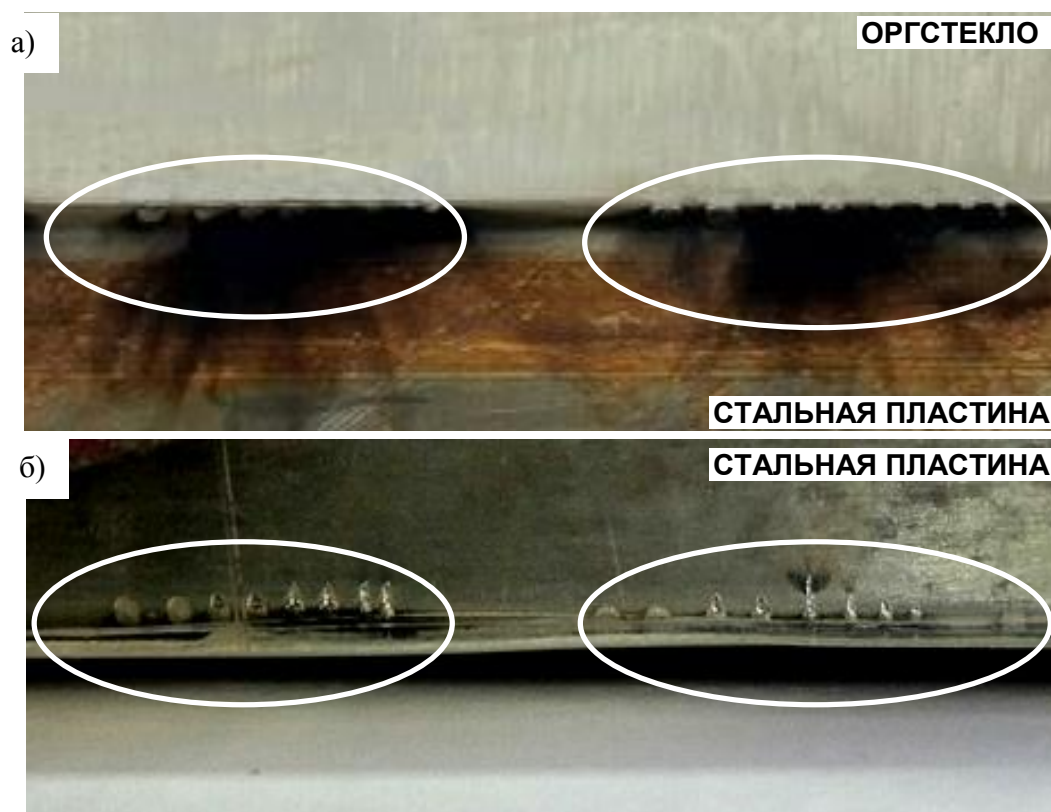


Рис. 1. Отпечаток импульса: а – в направлении лазерного луча; б – перпендикулярно лазерному лучу

Так как тип лазерного источника импульсно-периодический и длина волны составляет 1,06 мкм, то лазерное излучение беспрепятственно проходит через оргстекло и отпечаток остаётся только на поверхности металла. Лазерное воздействие производилось на максимальном рабочем напряжении 425 В; длительность импульса составляла 12,5 мс; режим лазера – одиночный. При простановке точек варьировали фокусное расстояние от 0 до 12 (по регулятору на установке) и форму импульса: плавное нарастание, колокол, прямоугольник, трапеция, плавный спад (задаётся программно).

Измерение геометрических параметров сварной точки производили при помощи измерительной лупы ЛИ-3-10х. При выявлении оптимальной формы точки исходили из соображения максимальной её глубины в сочетании с максимальной шириной.

Свариваемые образцы из стали 12Х18Н10Т размером 100х50х1,0 мм получены резкой на гильотинных ножницах с последующей механической обработкой свариваемых кромок и их обезжириванием и обезвоживанием.

Стыковые соединения образцов собирались на технологических планках размером 70х25х1,0 мм с простановкой точечных прихваток (см. рис. 2). Сварка осуществлялась на лазерной технологической установке Булат LRS 300 на режимах, представленных в табл. 1, при трапециевидальной форме импульса с односторонним формированием шва.

Для получения герметичного валика сварку вели на скорости, обеспечивающей перекрытие соседних точек на 50...60 % диаметра.

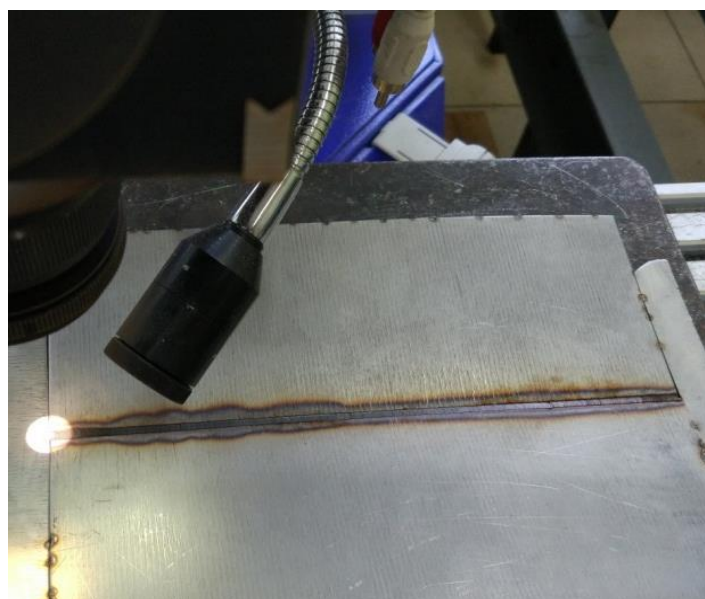


Рис. 2. Процесс сварки стали 12Х18Н10Т толщиной 1 мм

Таблица 1

Режимы лазерной сварки

Номер образца	Длительность излучения импульса, мс	Частота повторения импульсов излучения, Гц	Максимальная мощность излучения, Вт	Фокусное расстояние, ед.
1	6,00	4	450	5
2	8,00	5		6
3	10,00	6		7
4	12,50	7		8
5	14,00	3		9

Испытания на статическое растяжение образцов VIII типа (100x15x1,0 мм) по ГОСТ 6996-66 «Сварные соединения. Методы механических свойств» проводили на разрывной машине Instron 3382.

Пробоподготовку для исследования микроструктуры выполняли на настольном абразивном отрезном станке фирмы Delta AbrasiMet и шлифовально-полировальном станке марки EcoMet 250 с полуавтоматической насадкой AutoMet 250. Микроскопию проводили на оптическом микроскопе Nikon Eclipse MA 200. Произведено травление образцов в растворе соляной кислоты, глицерина и азотной кислоты в соотношении 4:4:3.

### Результаты исследования

Таким образом, при определении влияния формы импульса и фокусного расстояния получены пять участков с восемью проставленными точками (см. рис. 3).

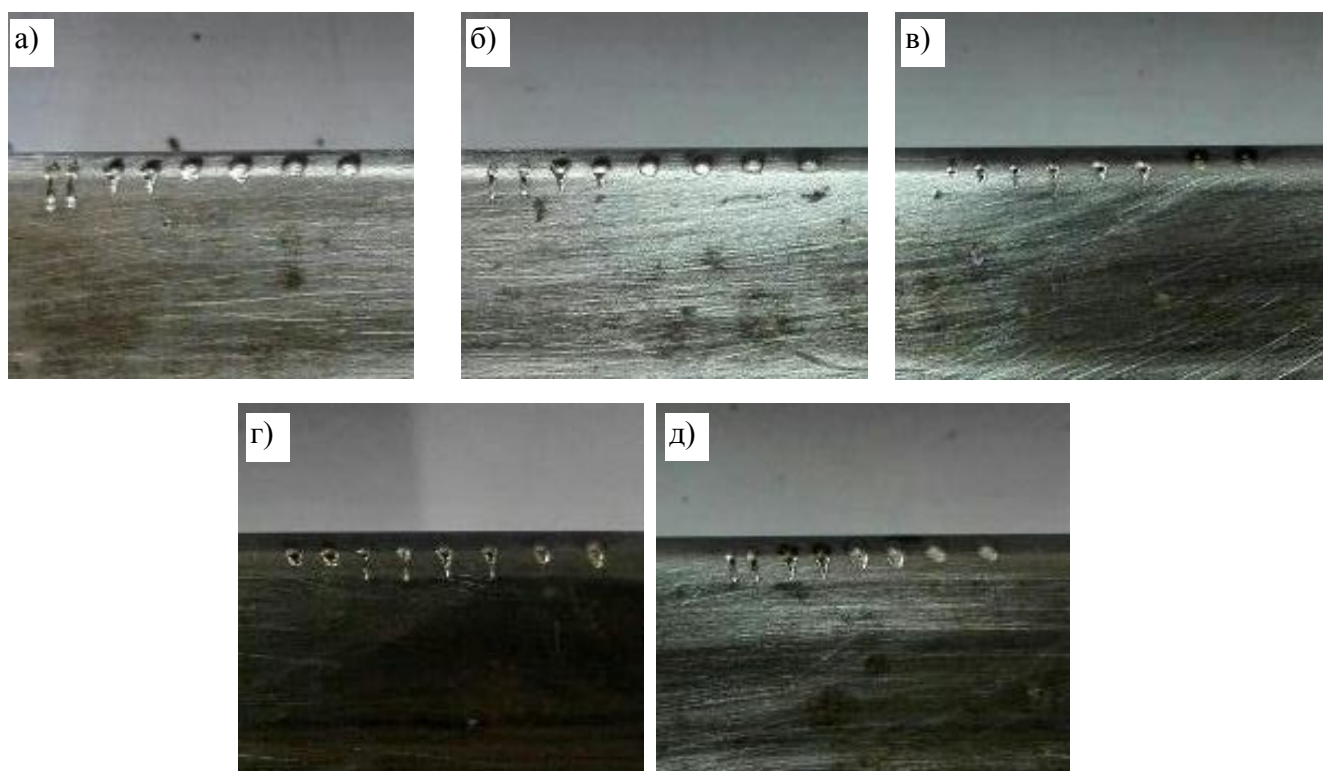


Рис. 3. Форма точки в зависимости от формы импульса и фокусного расстояния: а – плавное нарастание; б – колокол; в – прямоугольник; г – трапеция; д – плавный спад

Результаты измерения параметров точек представлены в табл. 2, на рис. 4 и 5.

Таблица 2

Результаты замера геометрии сварной точки при разной форме импульса и фокусном расстоянии

Фокусное расстояние	Форма импульса					
	плавное нарастание		колокол		прямоугольник	
	глубина	ширина	глубина	ширина	глубина	ширина
11	1,3	1,25	1,15	1,1	1	1,3
8	1,45	1,2	1,2	1,05	1,4	0,85
5	1,95	0,8	1,9	0,8	2,3	0,45
0	2,6	0,6	2,1	0,5	0,9	0,4

Фокусное расстояние	Форма импульса			
	трапеция		свободный	
	глубина	ширина	глубина	ширина
11	1,6	1,3	1,5	1
8	1,65	1,2	1,95	0,6
5	1,8	0,9	1,85	0,45
0	1,9	0,75	0,95	0,8

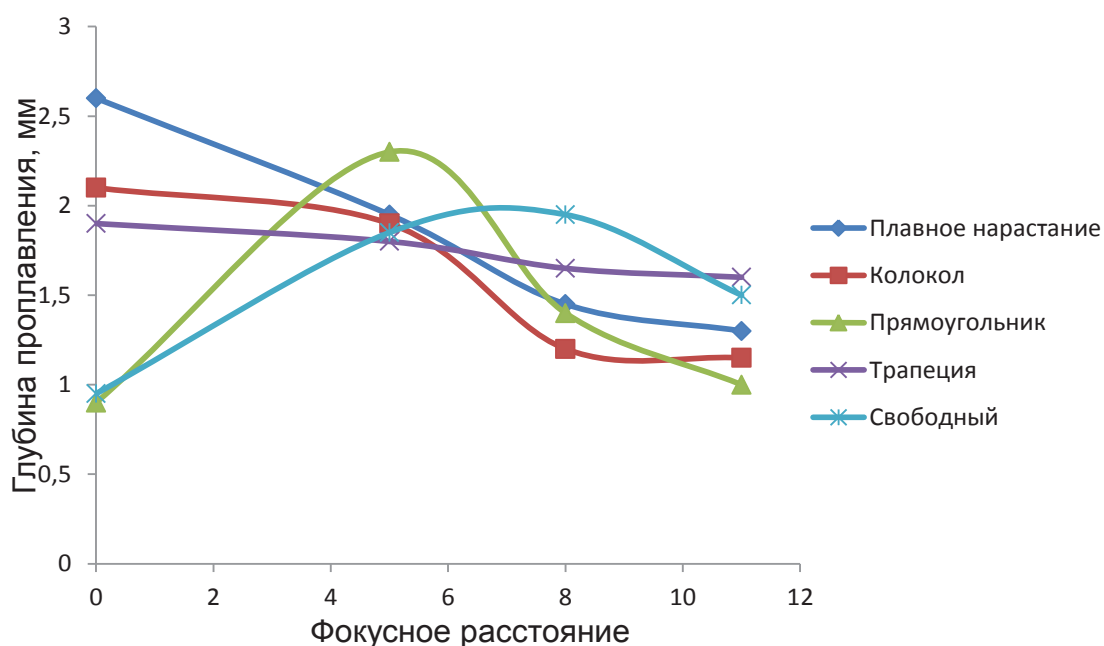


Рис. 4. Зависимость глубины проплавления от фокусного расстояния при различной форме импульса

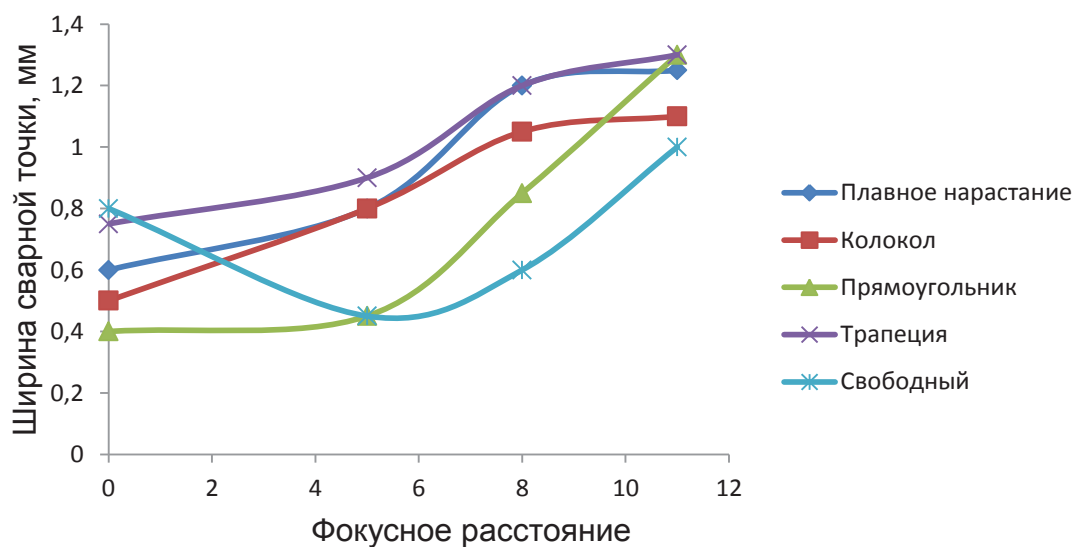


Рис. 5. Зависимость ширины сварной точки от фокусного расстояния при различной форме импульса

Определено, что оптимальной формой импульсов для сварки исследуемых материалов является трапеция на фокусном расстоянии, равном 8 единицам. Регулируемая форма импульсов влияет на снижение порога. При выборе формы импульсов в виде трапеции наблюдается формирование качественных сварных соединений и отсутствие выплесков из зоны сварки. Это объясняется более плавным достижением максимальной температуры в зоне сварки при уменьшении давления паров в сварочной ванне. Оптимальная длительность импульсов трапецидальной формы лежит в пределах 12...14 мс для нержавеющей стали, что соответствует данным, представленным в работе [2]. При этом удаётся получить более глубокое проплавление (до 30 %) и более высокую ширину сварного соединения.

Микроструктура сварных образцов представлена на рис. 6.

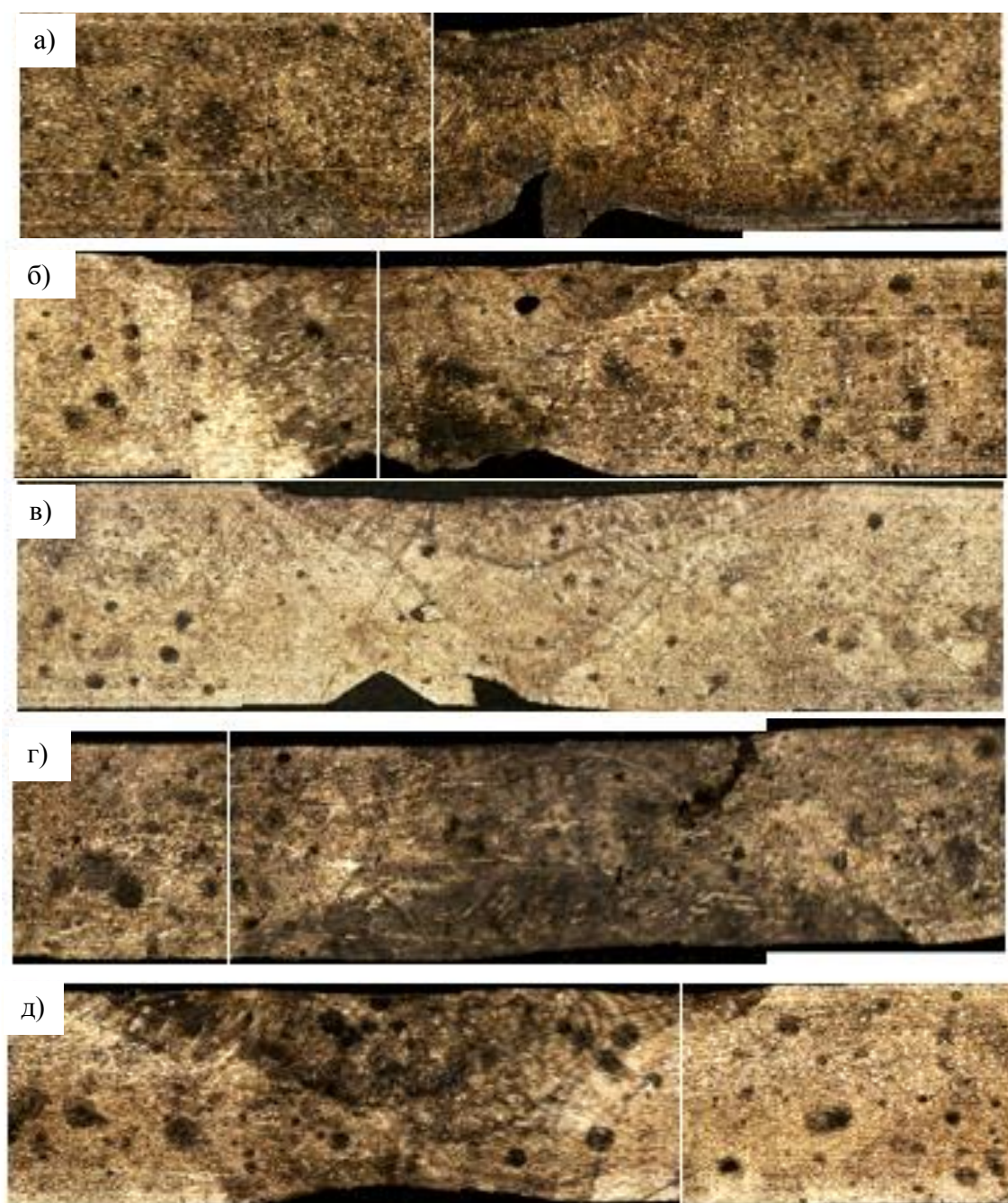


Рис. 6. Микроструктура сварных соединений  $\times 100$ :  
а – образец 1; б – образец 2; в – образец 3; г – образец 4; д – образец 5



Результаты металлографического исследования шлифов показали, что суммарное местное занижение сварного шва, минимальная толщина в зоне шва, ширина литой зоны сварного шва, смещение сваренных кромок, высота проплавления полностью удовлетворяют техническим требованиям к сварным соединениям пластин малой толщины только в образцах 4 и 5.

Результаты испытания на статическое растяжение сварных образцов представлены в табл. 3.

Анализ разрушений сварных образцов показывает, что образцы 4 и 5 разрушены по основному металлу, а образцы 1–3 – по околошовной зоне. Причиной этого послужило отсутствие провара корня шва или неудовлетворительная его геометрия (наличие утяжин и местных несплавлений).

Таблица 3

## Механические свойства сварных образцов

Номер образца	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Деформация при растяжении, %	Диаграмма разрушения
1.	190	588	26	
2.	166	581	20	
3.	131	413	30	
4.	128	591	80	
5.	153	648	80	
По ГОСТ 5632-2014 <sup>1</sup>	196	510	40	

## Примечания

<sup>1)</sup> ГОСТ5632-2014 «Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаро-стойкие и жаропрочные. Марки (введён 2015-01-01).

<sup>2)</sup> Приведены среднеарифметические значения из трёх измерений.

### **Выводы**

1. Установлена возможность получения сварных герметичных швов нержавеющей тонкостенных конструкций на установке BULAT LRS 300.

2. Управляя формой импульса и фокусным расстоянием по разработанной авторами уникальной методике, мы установили оптимальную форму сварочной точки, полученной лазерным излучением.

3. Установлено, что для сварки тонкостенных конструкций (толщина стенки 1 мм) наиболее подходящей является трапециевидальная форма импульса со значением фокусного расстояния 8 при максимальном рабочем напряжении 450 В; частотой и длительностью импульса 7 Гц и 12,5 мс режим лазера – одиночный. При использовании такого режима достигаются хорошее формирование корня шва и механические свойства сварного шва, соответствующие основному металлу.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Денисов, Б. С. Сварка в самолётостроении. Сварные конструкции МИГов / Б. С. Денисов, А. И. Мейлах. – М.: Машиностроение, 2007. – 358 с.
2. Григорьянц, А. Г. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 664 с.
3. Акулов, А. И. Технология и оборудование сварки плавлением: учебник для студентов вузов / А. И. Акулов, Г. А. Бельчук, В. Л. Демянцевич. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с. с ил.
4. Сварка в машиностроении: справ. пособие. В 4 т. Т 4 / под ред. Ю. Н. Зорина. – М.: Машиностроение, 1979. – 512 с. с ил.
5. Куркин, С. А. Лазерная сварка [Электронный ресурс] / С. А. Куркин. – Режим доступа: <http://mastery-of-building.org/princip-dejstviya-lazernoj-svarki/> (дата обращения: 23.05.2017).
6. Сварка нержавеющей сталей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.smart2tech.ru/svarka-nerzhaveyushchej-stali> (дата обращения: 25.05.2017).



**Ким В. А., Аунг Нгве Тэйн, Лысенко В. В., Афанасьева А. А.**

**V. A. Kim, Aung Ngwe Tain, V. V. Lysenko, A. A. Afanasyeva**

## **РОЛЬ МАСШТАБНОГО ФАКТОРА НА МУЛЬТИФРАКТАЛЬНУЮ ПАРАМЕТРИЗАЦИЮ МИКРОСТРУКТУР**

## **LARGE-SCALE FACTOR EFFECT ON MICROSTRUCTURE MULTIFRACTAL PARAMETRIZATION**

**Ким Владимир Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры материаловедения и технологии новых материалов Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел.: + 7 (914) 373-25-34. E-mail: sinerg@mail.ru.

**Mr. Vladimir A. Kim** – Doctor of Engineering, Professor, Material Technology and New Materials Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel.: + 7 (914) 373-25-34. E-mail: sinerg@mail.ru.

**Аунг Нгве Тэйн** – аспирант кафедры материаловедения и технологии новых материалов Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27; тел.: + 7 (909) 828-68-46. E-mail: aungngwethein7@gmail.com.

**Mr. Aung Ngwe Tain** – a postgraduate student, Material Technology and New Materials Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str.; tel.: + 7 (909) 828-68-46. E-mail: aungngwethein7@gmail.com.

**Лысенко Валерия Викторовна** – аспирант кафедры материаловедения и технологии новых материалов Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: valeri.168@mail.ru.

**Ms. Valeria V. Lysenko** – a postgraduate student, Material Technology and New Materials Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: valeri.168@mail.ru.

**Афанасьева Анна Алексеевна** – аспирант кафедры материаловедения и технологии новых материалов Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: a.afanaseva@infotech-kms.ru.

**Ms. Anna A. Afanasyeva** – a postgraduate student, Material Technology and New Materials Department, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: a.afanaseva@infotech-kms.ru.

**Аннотация.** В данной статье приведено исследование влияния кратности увеличения изображения микроструктуры на мультифрактальные спектры микроструктуры стали 45, рассчитанные по разным мерам. В качестве мер были приняты площадь, периметр микроструктурных объектов и фрактальная размерность их границ. Показано, что с повышением кратности увеличения изображения микроструктуры диапазон изменения величин мультифрактальных компонентов возрастает. Диапазон изменения и комплексные показатели мультифрактальных спектров принимают наибольшие значения при использовании в качестве меры площади микроструктурных объектов.

**Summary.** The effect of the multiplicity increase of the image of the microstructure on the multifractal spectra of the microstructure of steel 45 calculated by different measures was studied. The area, perimeter of microstructural objects and the fractal dimension of their borders were taken as measures. It is shown that with increasing magnification of the image of the microstructure, the range of changes in the values of multifractal components increases. The range of variation and complex indicators of the multifractal spectra take the greatest values when using microstructural objects as a measure of area.

**Ключевые слова:** микроструктура, фрактал, мультифрактал, статистическая сумма, числовое множество, неоднородность, упорядоченность.

**Key words:** microstructure, fractal, multifractal, statistical sum, numerical set, heterogeneity, orderliness.

УДК 621-03

### **Введение**

Изображения микроструктур, выявленные травлением металлографических шлифов и зафиксированные оптической или электронной микроскопией, представляют собой набор геометрических фигур с разной степенью цветовых оттенков. Материал имеет объёмную структурную организацию, но на фотографиях отображается только её срез в прямолинейной плоскости шлифа, поэтому все структурные геометрические объекты на изображениях теряют единицу мерности, то есть реальные трёхмерные объекты представляются в виде двумерных фигур, двумерные – одномерными, а одномерные – точечными [1; 2].

С формальной точки зрения изображение микроструктур – это комбинация геометрических множеств с определённой степенью упорядоченности и разномасштабным подобием, которые можно отнести к категории фрактальных систем. Из всего множества геометрических структурных объектов выделяются те, которые несут наибольшую информационную нагрузку, и их можно объединить единым понятием «интерфейс структурного состояния». Количественное описание структурных превращений заключается в выборе интерфейса структурного состояния, определении его числовых показателей и анализе их изменений при различных энергетических воздействиях на материал [3].

Традиционно к интерфейсу структурного состояния поликристаллического материала относят межзёренные и межфазовые границы раздела. По их форме, локальной кривизне и упорядоченности можно анализировать технологию производства материала и обработки изделия, условия эксплуатации, причины потери работоспособности и механизмы разрушения [4; 5].

Неоднородность, упорядоченность и периодичность микроструктуры материалов, находящихся в неравновесном состоянии, долгое время анализировались только на качественном уровне. Применение фрактального и мультифрактального формализма при описании микроструктур открывает широкие возможности для количественной оценки структурной организации материала, уточняет и раскрывает новые стороны известных механизмов структурных превращений. Мультифрактальные спектры структурной организации материала являются основой для определения количественных комплексных показателей микроструктур, таких как неоднородность и степень беспорядка. Однако сами мультифрактальные спектры зависят от кратности увеличения изображения микроструктур. С повышением кратности увеличения изображений микроструктур уменьшается площадь поверхности шлифа, фиксируемая на фотографии, выявляются более мелкие объекты, чётче проявляются локальная кривизна границ и неоднородность структурной организации материала. Это приводит к увеличению диапазона числового множества, по которому рассчитывается статистическая сумма.

В статье изложены результаты исследований по влиянию масштабного фактора и количественной характеристики микроструктуры, выбираемой в качестве меры для вычисления мультифрактальных спектров, на комплексные показатели структурной неоднородности и упорядоченности.

### **Мультифрактальный формализм**

Мультифрактальный формализм базируется на понятии статистической суммы, для составления которой в качестве меры можно использовать любой количественный показатель структурной организации материала. Методика генерации мультифрактальных спектров и математический аппарат, описывающий эту процедуру, достаточно подробно изложены в научной литературе и активно используются в материаловедческих исследованиях [6; 7].

Изображение микроструктуры рассматривается как двумерный объект, помещённый в евклидово пространство. Изображение покрывается сеткой из ячеек прямоугольной формы одинакового размера. В качестве меры выбирается какой-либо количественный структурный показатель и определяется его значение в каждой ячейке. Совокупность полученных значений представляет множество  $L(k) = \{M_1, M_2, M_3, \dots, M_k\}$ , которое является одним из вариантов числового представления микроструктуры материала.

Относительная величина меры вычисляется по формуле

$$p_i(\varepsilon) = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^k M_i}, \quad (1)$$

где  $p_i(\varepsilon)$  – относительная величина меры (плотность) каждой ячейки;  $M_i$  – абсолютная величина меры каждой ячейки;  $k$  – число ячеек.

Очевидно, что

$$\sum_{i=1}^k p_i(\varepsilon) = 1. \quad (2)$$

Статистическая сумма определяется таким образом:

$$Z(q, \varepsilon) = \sum_{i=1}^k p_i^q(\varepsilon), \quad (3)$$

где  $q$  – произвольные вещественные целые числа от  $-\infty$  до  $+\infty$ .

Компоненты мультифрактального спектра рассчитываются по формуле

$$D_q = \left( \frac{1}{q-1} \right) \cdot \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln[Z(q, \varepsilon)]}{\ln \varepsilon}, \quad (4)$$

где  $\varepsilon = \left( \frac{1}{k} \right)^{0,5}$  – характеристический линейный размер ячейки.

Значение мультифрактала при  $q = 1$  определяется по отдельной формуле

$$D_1 = \frac{\sum_{i=1}^k p_i \cdot \ln(p_i)}{\ln \varepsilon}. \quad (5)$$

При  $q \rightarrow +\infty$  (положительная вервь мультифрактального спектра) основной вклад в обобщённую статистическую сумму вносят ячейки, имеющие наибольшую плотность, а при  $q \rightarrow -\infty$  (отрицательная ветвь мультифрактального спектра) – наименьшую плотность. Следовательно, значения компонент мультифрактального спектра и диапазон их варьирования показывает степень неоднородности числового множества  $L(k)$ .

Отдельные компоненты мультифрактального спектра имеют различный физический смысл.  $D_0$ , соответствующая  $q = 0$ , представляет собой обычную хаусдорфову размерность множества  $L(k)$ . Она является наиболее грубой характеристикой мультифрактала и не несёт никакой информационной нагрузки о статистических свойствах микроструктуры, а указывает на мерность евклидова пространства и характер разбивки изображения на ячейки.

Величина  $D_1$  тесно связана с энтропией фрактального множества и является характеристикой меры беспорядка в числовом множестве  $L(k)$ .

При  $q = 2$  статистическая сумма представляет собой корреляционный интеграл, поэтому  $D_2$  называют корреляционной размерностью. Если бы числовое множество  $L(k)$  представляло собой набор точек, то величина  $D_2$  – меру того, что выбранные наугад 2 точки будут располагать-

ся в одной ячейке. Применительно к структурной организации материала  $D_2$  можно трактовать как меру того, что вблизи какого-либо микроструктурного элемента располагается хотя бы один аналогичный объект, то есть это мера образования упорядоченных групп однотипных микроструктур. Все остальные компоненты множества  $D_q$  представляют собой мультифрактальный спектр. Большие значения  $D_q$  при  $q \gg 1$  соответствуют высоким показателям энтропии, в связи с чем величина  $D_q$  может быть применена для распознавания визуально не различимых или слабо различимых друг от друга микроструктур.

Компоненты мультифрактального спектра используются для расчёта ряда показателей структурной организации материала, например [7]:

$$\Delta_q = D_1 - D_q. \quad (6)$$

$$K_\infty = D_{-\infty} - D_{+\infty}. \quad (7)$$

С их помощью оцениваются степень беспорядка, упорядоченности и периодичности микроструктуры соответственно. Чем больше  $\Delta q$  при  $q \gg 1$ , тем более упорядочена структура и в ней сильнее проявляется периодическая составляющая. Величина  $K_\infty$  конечна и является мерой беспорядка или хаоса в структурной организации материала, то есть чем больше величина  $K_\infty$ , тем больше беспорядка. На практике для вычисления комплексных мультифрактальных показателей достаточно  $q = 40$ . При более точных исследованиях  $q = 100$  или даже  $q = 200$  [6; 7].

#### **Методика исследования**

Объектом исследования стали микроструктуры стали 45, полученные при увеличении в 100, 200, 400 и 1000 крат. Травление шлифов осуществлялось 4%-м раствором азотной кислоты в этиловом спирте. Цифровые изображения микроструктур получали с помощью металлографического микроскопа Nikon 200A.

Обработка изображений выполнялась программой Image.Pro.Plus.5.1 (США) и включала корректировку резкости, снятие контрастной маски, выделение границ с помощью фильтра Лапласа и калибровку изображений для её привязки к соответствующей масштабной линейке. Обработка изображений проводилась только по «тёмным» микроструктурным объектам. При снятии контрастной маски к «тёмным» объектам относили микроструктуры, у которых соотношение чёрных и белых цветов составляло по 128 пикселей [2; 3], затем вычислялись количественные показатели микроструктур, в частности, площадь  $F_j$ , периметр  $P_j$  каждого микроструктурного объекта и фрактальная размерность границ  $D_j$ . Алгоритм определения фрактальной размерности границ в программе Image.Pro.Plus.5.1 базируется на методе хорд. В качестве мер для расчёта мультифрактальных спектров использовались эти же показатели. При расчёте статистических сумм и мультифрактальных спектров показатель  $q$  варьировался в диапазоне целочисленных величин от -50 до +50.

#### **Результаты и их анализ**

На рис. 1 представлены микроструктуры исследуемой стали 45 при различной кратности увеличения. Материал состоит из ферритных и перлитных зёрен с различными границами раздела. Наибольшую информацию о структурной организации материала несут границы зёрен, поэтому в материаловедении их называют интерфейсом структурного состояния. Микроструктура при 100- и 200-кратном увеличении не выявляет развитость и локальную кривизну границ, но позволяет с достаточной точностью определять процентное соотношение ферритных и перлитных зёрен и по ним рассчитывать содержание углерода в сталях.

При 400-кратном увеличении хорошо выявляется структурная организация границ и начинает проявляться строение перлитной фазы. При кратности увеличения, равной 1000, можно различить участки границ с высокой и низкой когерентностью, а в структуре перлита чётко проявля-

ются ферритные и цементитные пластинки. Границы с низкой когерентностью, обладая большей поверхностной энергией, сильнее подвергаются травлению и приобретают большую толщину и более тёмный оттенок [8; 9; 10]. Начиная с 400-кратного увеличения, можно различить ферритные и перлитные зёрна с более высокой свободной энергией или химическим потенциалом, которые сильнее подвергаются химическому травлению и приобретают более тёмный оттенок.

Чем выше кратности увеличения, тем меньше площадь поверхности шлифа, фиксируемая на изображении микроструктуры, поэтому микроструктуры, полученные при 100- и 200-кратном увеличении, представляются более однородными по сравнению с 400- и 1000-кратным увеличением. Неоднородность микроструктуры при кратности увеличения, равной 1000, очевидна, поэтому для обеспечения статистической точности необходимо увеличивать количество изображений, подвергаемых анализу.

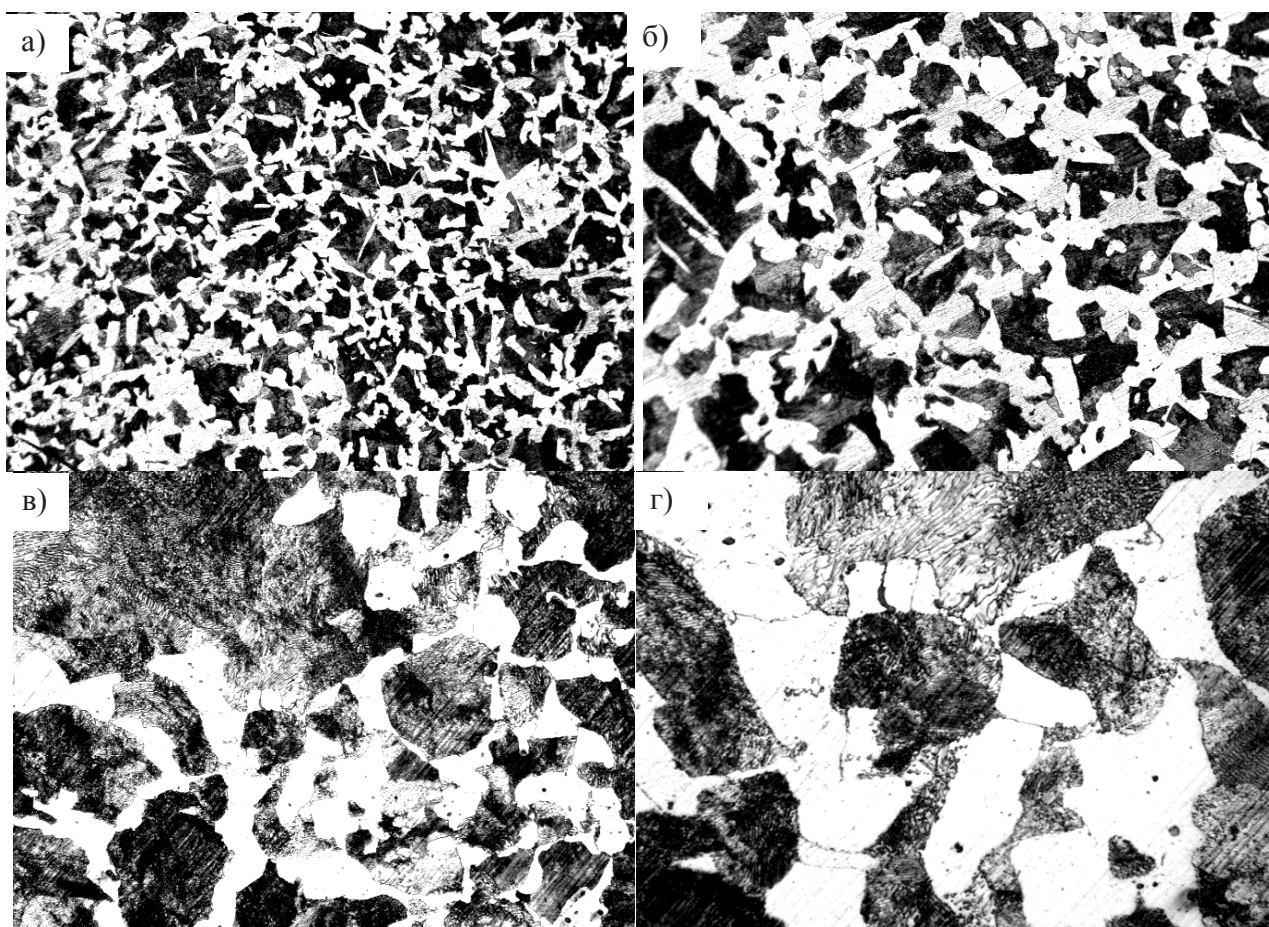


Рис. 1. Микроструктура стали 45 при увеличении: а – в 100 крат; б – 200 крат; в – 400 крат; г – 1000 крат

На рис. 2, 3 и 4 представлены мультифрактальные спектры, рассчитанные по различным мерам, а в табл. 1 – комплексные показатели, рассчитанные по мультифрактальным спектрам.

Мультифрактальные спектры, рассчитанные по периметру и площади микроструктурных объектов, имеют много общего. При сравнительном анализе областей положительных и отрицательных значений  $q$  они носят несимметричный характер.

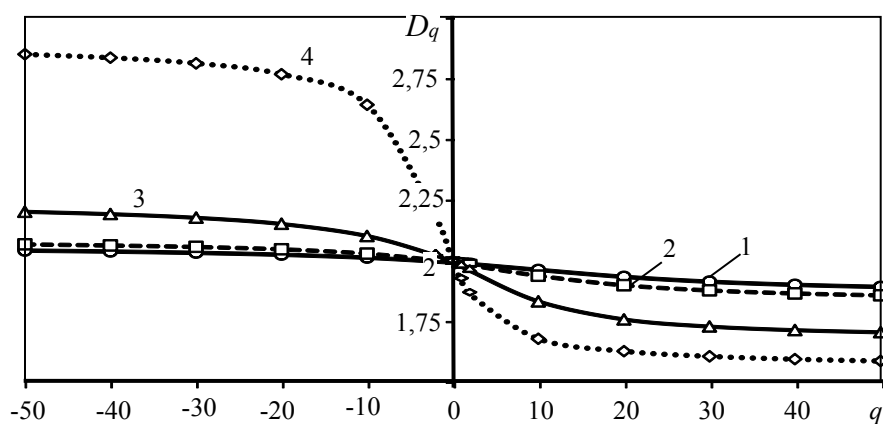


Рис. 2. Мультифрактальные спектры, рассчитанные по периметрам микроструктурных объектов: 1 – увеличение в 100 крат; 2 – 200 крат; 3 – 400 крат; 4 – 1000 крат

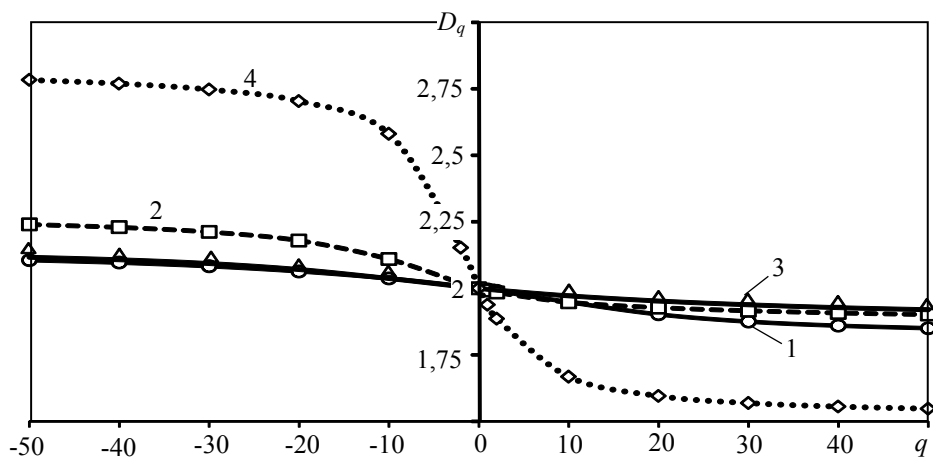


Рис. 3. Мультифрактальные спектры, рассчитанные по площади микроструктурных объектов: 1 – увеличение в 100 крат; 2 – 200 крат; 3 – 400 крат; 4 – 1000 крат

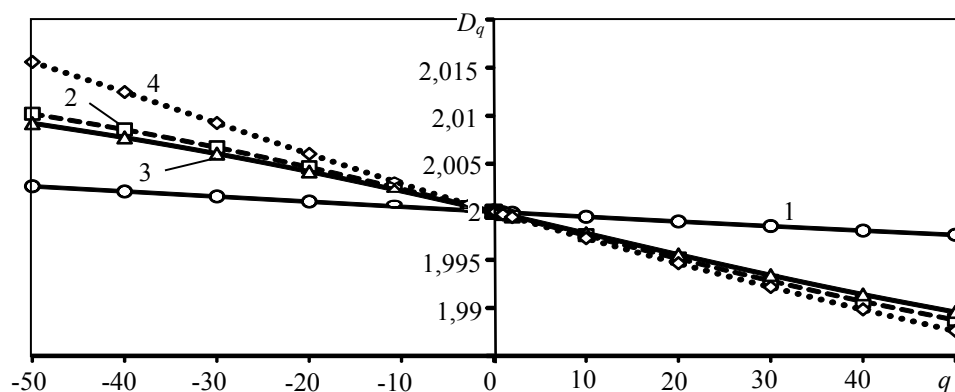


Рис. 4. Мультифрактальные спектры, рассчитанные по фрактальной размерности границ микроструктурных объектов: 1 – увеличение в 100 крат; 2 – 200 крат; 3 – 400 крат; 4 – 1000 крат

Меньшие значения диапазона изменений мультифрактальных спектров в положительной области ( $0 < q < +50$ ) по сравнению с отрицательной областью ( $-50 < q < 0$ ) указывают, что в микроструктуре материала преобладают мелкие микроструктурные объекты. С повышением кратности увеличения изображения микроструктуры величина компонентов мультифрактального спек-



тра возрастает, но эта закономерность строго соблюдается в случае использования в качестве меры площади микрообъектов. В мультифрактальных спектрах, рассчитанных по периметру микроструктурных объектов, имеются нарушения этой закономерности в положительной области  $q$  ( $0 < q < 50$ ). Например, при кратности увеличения, равной 100, значения мультифрактальных спектров принимают большие значения, чем при кратности, равной 400.

Компоненты мультифрактального спектра, рассчитанные по площади микроструктурных объектов, характеризуются более широким диапазоном изменения и большими величинами комплексных показателей  $K_\infty$  и  $\Delta_{50}$ , поэтому предпочтительной мерой для расчёта мультифракталов является площадь микроструктурных объектов.

Характер изменения мультифрактального спектра, рассчитанного по фрактальной размерности границ (см. рис. 4), принципиально отличается от предыдущих. Диапазон изменения компонентов спектра и значения комплексных показателей на порядок ниже по сравнению с характеристиками мультифракталов, рассчитанных по площади и периметру микроструктурных объектов. При этом общая закономерность повышения диапазона мультифрактальных спектров с повышением кратности увеличения сохраняется.

Таблица 1

Комплексные показатели, рассчитанные по мультифрактальным спектрам

Кратность увеличения изображения	Мера для расчёта мультифрактального спектра					
	Периметр микрообъектов		Площадь микрообъектов		Фрактальная размерность границ	
	$K_\infty$	$\Delta_{50}$	$K_\infty$	$\Delta_{50}$	$K_\infty$	$\Delta_{50}$
100	0,1489	0,0966	0,2555	0,1451	0,0051	0,0023
200	0,2091	0,1292	0,3391	0,0903	0,0214	0,0112
400	0,4942	0,2694	0,1968	0,0766	0,0197	0,0102
1000	1,2568	0,3305	1,2360	0,3909	0,0197	0,0102

## Выводы

С повышением кратности увеличения изображений микроструктур уменьшается площадь поверхности шлифа, зафиксированная на фотографии; выявляются более мелкие объекты, чётче проявляется локальная кривизна границ и неоднородность структурно организации материала. Это приводит к увеличению диапазона числового множества, по которому рассчитывается статистическая сумма и мультифрактальный спектр.

Наилучшая информативность мультифрактального спектра достигается, если в качестве меры для его расчёта используется площадь микроструктурных объектов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Брандон, Д. Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля / Д. Брандон, У. Каплан. – М.: Техносфера, 2004. – 384 с.
2. Претт, У. Цифровая обработка изображений / У. Претт; пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 480 с.
3. Ким, В. А. Методика цифровой обработки изображений микроструктуры алюминиевых сплавов в среде MATLAB / В. А. Ким, О. В. Башков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2013. – Т. 79. – № 10. – С. 34-40.
4. Синергетика и фракталы в материаловедении / В. С. Иванова, А. С. Баланкин, И. Ж. Бунин [и др.]. – М.: Наука, 1994. – 383 с.
5. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р. Р. Балахонов, А. В. Болеста, М. П. Бондарь [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.
6. Встовский, Г. В. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов: моногр. / Г. В. Встовский, А. Г. Колмаков, И. Ж. Бунин. – М. – Ижевск, 2001. – 116 с.
7. Божокин, С. В. Фракталы и мультифракталы / С. В. Божокин, Д. А. Паршин. – М. – Ижевск, 2001. – 128 с.
8. Кристиан, Дж. Теория превращений в металлах и сплавах. В 2 ч. Ч. 1. Термодинамика и общая кинетическая теория / Дж. Кристиан; пер. с англ. А. Я. Беленького и Д. Е. Темкина. – М.: Мир, 1978. – 807 с.
9. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р. Р. Балахонов, А. В. Болеста, М. Н. Бондарь [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.
10. Вест, А. Химия твёрдого тела. Теория и приложения. В 2 ч. Ч. 1. / А. Вест; пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 558 с.

НАУЧНАЯ ЖИЗНЬ  
SCIENTIFIC LIFE

**Петров В. В., Шпилев А. М., Евстигнеев А. И., Мокрицкий Б. Я., Коневцов Л. А.**  
**V. V. Petrov, A. M. Shpilyov, A. I. Evstigneev, B. Ya. Mokritskii, L. A. Konevtsov**

**Д. И. МЕНДЕЛЕЕВ – СИМВОЛ НАУКИ О МАТЕРИАЛАХ И ПАТРИОТ РОССИИ**

**D. I. MENDELEYEV – A SYMBOL OF SCIENCE ABOUT MATERIALS AND A PATRIOT OF RUSSIA**

**Петров Виктор Викторович** – доктор технических наук, профессор кафедры технологии переработки нефти и полимеров Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: petrovpng@mail.ru.

**Mr. Victor V. Petrov** – Dr. hab. Of Engineering, Professor, Department of Technology of oil and polymer processing, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: petrovpng@mail.ru.

**Шпилев Анатолий Михайлович** – доктор технических наук, профессор Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: Shpilev@knastu.ru.

**Mr. Anatoly M. Shpilyov** – Dr. hab. of Engineering, Professor, Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: Shpilev@knastu.ru.

**Евстигнеев Алексей Иванович** – доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной работе Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: diss@knastu.ru.

**Mr. Alexey I. Yevstigneyev** – Dr. hab. of Engineering, Professor, Vice-Rector for Science and Innovation Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: diss@knastu.ru.

**Мокрицкий Борис Яковлевич** – доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: boris@knastu.ru.

**Mr. Boris Ya. Mokritskii** – Dr. hab. of Engineering, Professor of the Department of mechanical engineering of Komsomolsk-on-Amur State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: boris@knastu.ru.

**Коневцов Леонид Алексеевич** – научный сотрудник УРАН Института материаловедения Хабаровского научного центра ДВО РАН (Россия, Хабаровск). E-mail: konevts@narod.ru.

**Mr. Leonid A. Konevtsov** – Researcher, Institute for Materials Technology, City of Khabarovsk Scientific Centre, the Far-Eastern branch of the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: konevts@narod.ru.

**Аннотация.** В данной статье показано, что жизненный путь и творческая деятельность Д. И. Менделеева, начиная от его образовательного, затем научного и общественно-просветительского периодов, мотивированы его мыслями по обеспечению блага народу своей страны, что не вписывалось и не вписывается в концептуальные установки ряда чиновников как его времени, так и настоящего. Тем не менее его труды ознаменовали собой целую эпоху в развитии науки о материалах. И лишь спустя сотню лет со дня его смерти зарубежная научная общественность осознала и высоко оценила его первостепенный вклад – он был признан человеком, внёсшим в становление и развитие науки о материалах наиболее существенный вклад среди землян за 30 тыс. лет. Показано, что побудительным мотивом деятельности Д. И. Менделеева, обозначившего основные направления развития своей страны, являлись его мысли о своём народе, совершенствовании образования, науки, производства и общественно-политического устройства своей страны. Его гениальная прозорливость, сформулированные предложения для подъёма страны, развития её производительных и духовных сил сегодня особенно актуальны.



**Summary.** It is shown that D. I. Mendeleev's course of life and creative activity, beginning from his educational period, then the scientific and public education, are motivated by his thoughts on ensuring the welfare of the people of his country, which did not fit and do not fit into the conceptual attitudes of a number of officials of both his time and the present. However, his work marked a whole epoch in the development of the science of materials. Only a hundred years after his memory, the foreign scientific community realized and highly appreciated its primary contribution – he was recognized as a man who made the most significant contribution among people to the formation and development of the science of materials for 30 thousand years. It is shown that the motive of D. I. Mendeleev, who outlined the main directions of development of his country, were his thoughts about his people, improving education, science, production, and the socio-political structure of his country. His ingenious insight, the formulated proposals for the rise of the country, the development of its productive and spiritual forces are especially relevant today.

**Ключевые слова:** таблица Менделеева, химия, наука о материалах, образование, интересы народа, правительство, промышленность.

**Key words:** periodic table of Mendeleev's, chemistry, education, government, industry, a science about materials, the interests of the people.

УДК 54(092):620ю22

### Введение

Дмитрий Иванович Менделеев (1834–1907) – великий русский учёный-энциклопедист (химик, физико-химик, физик, метролог, педагог, мыслитель, общественный деятель, патриот своей страны, основоположник научного периода в развитии наук о материалах) (см. рис. 1). Его имя вызывает восхищение у большинства известных и молодых учёных.

Дмитрий Иванович родился в 1834 году в г. Тобольске в семье директора гимназии, попечителя народных училищ Тобольской губернии. В 1849-м окончил гимназию, а в 1850 году поступил в Главный педагогический институт в Петербурге, где активно занимался научной работой; написал статью «Химический анализ пирита из Финляндии» (1854). С титулом «Старший учитель» в 1856 году Менделеев окончил физико-математический факультет с золотой медалью. В 1859–1861 годах он стажировался в лаборатории Бунзена в Гейдельберге «для усовершенствования в науках». Его друзьями были Иван Сеченов, Александр Бородин, Илья Мечников; они с увлечением занимались химией. В это время Менделеев открыл температуру абсолютного нуля. Друзей объединяла не только химия, но и музыка, искусство, путешествия.

В 1863 году Д. И. Менделеев вернулся в Петербург, стал профессором Петербургского технологического института, издал первый русский учебник «Органическая химия», удостоенный Демидовской премии Петербургской Академией наук. В 1865-м он защитил докторскую диссертацию на тему «О соединении спирта с водой», в которой заложил научные основы о растворах. В эти же годы создал гидратную теорию растворов. Вскоре, после защиты докторской диссертации в 1867 году, возглавил кафедру химии, систематически занимался изучением растворов и изоморфных смесей.

Закономерности распределения элементов в природе занимали Д. И. Менделеева с 1860 года и продолжались до создания первого варианта периодического закона элементов и мирового конгресса химиков в Карлсруэ 1869 года. Работая над «Основами химии» (1869–1871), Дмитрий Иванович подытожил исследования, связанные с периодическим законом химических элементов (см. рис. 1), ставшим одним из выдающихся открытий человеческой мысли в области наук о материалах, и в 1871-м в труде «Периодическая законность для химических элементов» написал «Основы химии», в котором развил эту идею.



*D. Mendeleev*

Периодическая система элементов по группам и рядам.

Ряд	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ:											
	0	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			
1	—	Водо- родъ. H 1,008	—	—	—	—	—	—	—			
2	Гелий. He 4,0	Литий. Li 7,03	Берил- лий. Be 9,1	Боръ. B 11,0	Угле- родъ. C 12,0	Азотъ. N 14,01	Кисло- родъ. O 16,00	Фторъ. F 19,0	—			
3	Неонъ. Ne 19,9	На- трий. Na 23,05	Маг- ний. Mg 24,36	Алю- минъ. Al 27,1	Крем- ній. Si 28,2	Фос- форъ. P 31,0	Сѣра. S 32,06	Хлоръ. Cl 35,45	—			
4	Ар- гонъ. Ar 38	Каль- ций. Ca 39,15	Каль- ций. Ca 40,1	Сканди- й. Sc 44,1	Титанъ. Ti 48,1	Вана- дій. V 51,2	Хромъ. Cr 52,1	Марганецъ. Mn 55,0	Же- лѣзо. Fe 55,9	Кобальтъ. Co 59	Никель. Ni 59	(Cu)
5	—	Мѣдь. Cu 65,6	Цинкъ. Zn 65,4	Гал- лий. Ga 70,0	Гер- манъ. Ge 72,5	Мышь- ьякъ. As 75	Сѣ- ле- нъ. Se 79,2	Бромъ. Br 79,95	—	—	—	—
6	Крип- тонъ. Kr 81,8	Руби- дий. Rb 85,5	Строн- цій. Sr 87,6	Ит- трий. Y 89,0	Цир- конъ. Zr 90,6	Нιο- бій. Nb 94,0	Молиб- денъ. Mo 96,0	—	Руте- ний. Ru 101,7	Родий. Rh 102,0	Палладій. Pd 106,5	(Ag)
7	—	Сере- бро. Ag 107,93	Кад- мій. Cd 112,4	Индій. In 115,0	Оло- во. Sn 119,0	Сурь- ма. Sb 120,2	Тел- луръ. Te 127	Юдъ. J 127	—	—	—	—
8	Ксе- нонъ. Xe 128	Цези- й. Cs 132,9	Барий. Ba 137,4	Лан- танъ. La 138,9	Цер- ий. Ce 140,2	—	—	—	—	—	—	—
9	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	Иттер- бий. Yb 173	—	Тан- талъ. Ta 183	Вольф- рамъ. W 184	—	Ос- мій. Os 191	Ири- дий. Ir 193	Платина. Pt 194,8	(Au)
11	—	Зо- лото. Au 197,2	Ртуть. Hg 200,0	Талий. Tl 204,1	Свин- ецъ. Pb 206,9	Вис- мутъ. Bi 208,5	—	—	—	—	—	—
12	—	—	Радій. Ra 225	—	Термъ. Th 232,5	—	Уранъ. U 238,5	—	—	—	—	—

Высшіе солеобразные окислы:  
 R R<sup>0</sup> | R<sup>0</sup> | RO | R<sup>2</sup>O<sup>3</sup> | RO<sup>2</sup> | R<sup>2</sup>O<sup>5</sup> | RO<sup>3</sup> | R<sup>2</sup>O<sup>7</sup> | RO<sup>4</sup>

Высшія газообразныя водородныя соединения:  
 RH<sup>4</sup> | RH<sup>3</sup> | RH<sup>2</sup> | RH

Рис. 1. Дмитрий Иванович Менделеев и его периодический закон

В 1876 году Д. И. Менделеева избрали членом-корреспондентом Петербургской Академии наук. Однако свойственные Дмитрию Ивановичу личная научная смелость и самостоятельность суждений привели к недоброжелательному отношению к нему ряда высших чиновников, утверждавших его в неблагонадёжности и враждебности, так как он не мирился «ни с какими безобразиями существующего мира». Поэтому дальнейшая судьба гениального русского учёного складывалась непросто. В «Проекте реорганизации Академии наук», изложенном в одной из статей Дмитрия Ивановича, было требование решительным образом изменить «все направления деятельности и всю её структуру». Менделеев утверждал, что в том виде, в каком существует Академия наук, она не имеет требуемого значения, но могла бы иметь как для интересов России, так и для мирового развития науки. В науке он противостоял насильственно-бюрократическому навязыванию «установок сверху», заявляя: «Наука есть дело вольное и совершенно свободное». Эти выводы Менделеева не нравились многим клановым чиновникам (как и нынешним слугам народа, пробравшимся в руководство страны). Это привело к тому, что хотя Дмитрий Иванович был выдвинут кандидатом на звание академика в 1880 году, тем не менее он был забаллотирован. Влиятельные чиновники посчитали, что научные труды Менделеева «...недостаточно фундаментальны». Это всё похоже на нашу действительность... В 1890 году Менделеев уволился из университета в знак протеста против сужения университетской автономии. После прочтения последней лекции Дмитрий Иванович, увидев в зале жандармов (современным языком, «полицаев»): чиновники опасались студенческих волнений), сел на стул и, обхватив руками голову, заплакал... он простался с университетом.

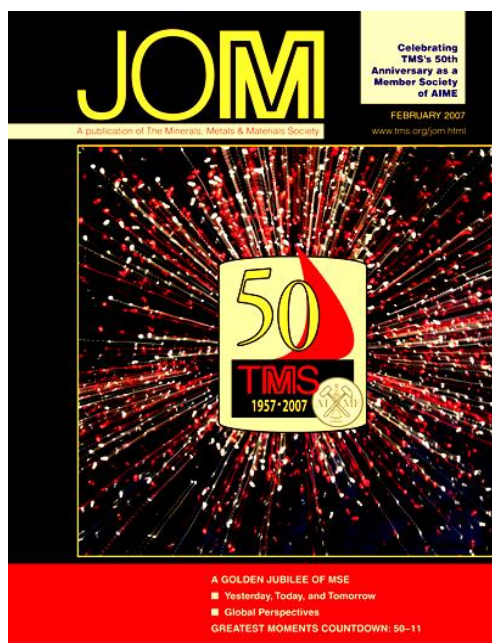
После увольнения у Д. И. Менделеева начался новый этап научной, просветительской и практической работы во благо России. Он стал директором Главной палаты мер и весов. В это время его единомышленником во многих делах был его друг, премьер России граф С. Ю. Витте. В 1990 году он разработал программу экономического преобразования России, создал физическую

теорию весов, был консультантом научно-технической лаборатории Морского министерства, в 1892-м изобрёл бездымный порох и занимался его производством. В 1905 году издал книгу «Заветные мысли», в 1906-м – книгу «К познанию России», в которой обобщил свои идеи по науке, образованию, общественной деятельности и производству. В жизни и деятельности Д. И. Менделеева можно выделить условно три этапа: 1) образовательный (от поступления в гимназию (1841) до завершения научной стажировки в Германии); 2) Д. И. Менделеев – выдающийся учёный, автор периодического закона и многих других научных работ (1861–1880); 3) общественно-просветительская деятельность (1880–1907).

### Дмитрий Иванович Менделеев – первый в списке важнейших событий и людей, оказавших значительное влияние на развитие науки о материалах

В одном из лучших междисциплинарных изданий по науке о материалах JOM [23] в 2006 году был опубликован список 100 наиболее важных событий и людей, повлиявших на развитие наук о материалах, утверждённый путём голосования на встрече материаловедов общества TMS в Орlando (США, 4200 присутствующих из 68 стран). В этот список от нашей страны был представлен лишь один человек – член-корреспондент Петербургской Академии наук Д. И. Менделеев. Через год, в феврале 2007 г., путём тайного голосования участников конференции TMS (Minerals, Metals, and Materials Society) был утверждён новый список 50 событий и людей, наиболее значимых достижений человечества в области науки о материалах («The 50 Greatest Moments in Materials»), приуроченный к 50-летию TMS, и он начинался с выдающегося открытия Д. И. Менделеева. На основании этого списка путём тайного голосования был получен список 10 наиболее важных событий в области материалов («Ten Greatest Materials Moments»), который также опубликован в журнале JOM (2007, № 2, стр.14) (см. рис. 2, а, б) [24]. И первой в списке-10 единогласно признана Периодическая система элементов, задуманная в 1864 году и опубликованная в России в 1869-м Дмитрием Ивановичем. Менделеевым. Данные о результатах признания величайшего события опубликованы и в журнале «Химия и жизнь» [10]. Таким образом, в год 185-летия со дня рождения Д. И. Менделеева и 150-летия со дня его эпохального открытия (2019), объявленный ООН Годом периодического закона химических элементов Д. И. Менделеева по признанию мирового научного сообщества учёных-материаловедов, можно говорить о Менделееве как о величайшем учёном Земли, внёсшем наиболее существенный вклад в развитие науки о материалах.

а)



б)

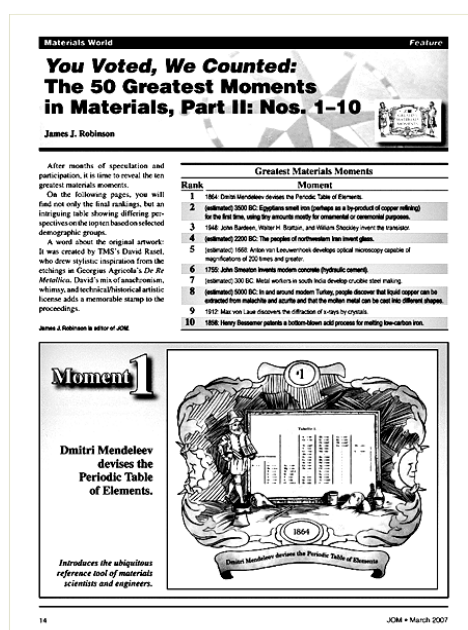


Рис. 2. Журнал JOM за 2007 год № 2: а – обложка журнала; б – изображение страницы 14 с указанием величайшего события и имени учёного (Д. И. Менделеева), внёсшего наибольший вклад в науку о материалах

Список охватывает период развития человеческой цивилизации за 30 тыс. лет (28 тыс. до н. э.), поэтому представляет значительный интерес его анализ. Отмеченные события в списке являются вехами становления и развития науки о материалах и фундаментом построения будущих её этапов. Они показывают вектор развития, являются базой прогноза, разработки перспективных направлений и исследований по созданию материалов с заданными свойствами, а также оценки вклада как отдельных учёных, так и коллективов в сокровищницу мировой науки. Эти направления развития науки о материалах, по нашему мнению, должны быть составными частями новой фундаментальной науки – материалогии, предложенной учёным-материаловедом А. Д. Верхотуровым [3]. Для оценки отдельных этапов развития науки о материалах используют теорию Т. Куна [3; 19; 12] о парадигмальном развитии наук. Ценную информацию, заложенную в содержание списка, по нашему мнению, также следует дополнить с учётом парадигмального подхода к развитию науки о материалах. Была предложена схема формирования науки о материалах: «идея – инкубационный период – практические парадигмы – научные парадигмы» [4]. В опубликованном списке не учтён парадигмальный подход, отсутствуют основополагающие данные о влиянии на развитие наук о материи, материале, «вещи» древнегреческих учёных, прежде всего Демокрита, Аристотеля, Теофаста, Левкипа. Не отмечено появление порошковой металлургии (П. Г. Соболевский, 1827), не отражены обоснование и разработка физико-химического анализа – парадигма Н. С. Курнакова (1908), парадигмы И. В. Тананаева (1970), Г. В. Самсонова (1976), создание электроэрозионной обработки Б. Р. Лазаренко (1943) и др. (см. рис. 3). С другой стороны, спорным является включение парадигмы Совье, который в 1912 году опубликовал результаты исследований железоуглеродистых сплавов по схеме «процесс – структура – свойства». При этом утверждается, будто парадигма Совье по сей день «является главной парадигмой материаловедения». Мы считаем, что на данном этапе развития материаловедению соответствует парадигма Г. В. Самсонова «состав – технология – структура – свойства», действующая параллельно с новой парадигмой набирающего силу нового этапа в развитии науки о материалах – материалогии. Тем более, сам А. Совье в своей монографии назвал русского учёного Д. К. Чернова «отцом металлургии», который ещё до А. Совье исследовал схему «процесс – структура – свойства», впервые установил полиморфические превращения сталей, открыл критические точки фазовых превращений («точки Чернова»). Выводы Д. К. Чернова, а позже и А. Совье, скорее, явились предтечей парадигмы И. В. Тананаева «состав – структура – свойства». Таким образом, в науке о материалах первая парадигма Д. И. Менделеева появилась задолго до появления парадигмы А. Совье, и внесение в список парадигмы А. Совье является необоснованным. Д. И. Менделеевым впервые в мировой науке была чётко установлена связь атомных весов и химического состава элементов. Это был величайший научный подвиг – прорыв в науках о материалах, с которого началась, собственно, сама наука о прогнозировании свойств веществ. С именем Менделеева появилась первая концептуальная основа, модель постановки проблем и их решений – парадигма Менделеева: «химический состав элементов → свойства». В работе «Общий характер диалектики как науки» Ф. Энгельс писал, что Д. И. Менделеев «совершил научный подвиг» (Архив К. Маркса и Ф. Энгельса, кн. 2, с. 227). Даже оппозиционер Л. Троцкий в докладе IV Менделеевскому съезду 17 сентября 1925 г. озвучил: «Логика периодической системы, хотя и перестроенной в дальнейшем, оказалась сильнее консервативных ограничений, которые хотел в неё внести её собственный творец... Через Периодическую систему Менделеева, через химию радиоактивных веществ диалектика празднует свою самую замечательную победу!» («Химия и жизнь», 2009, № 2).

В инкубационный период становления и развития науки о материалах в русле практической и познавательной идеи возникло алхимическое направление – превращение одного элемента в другой, появилась «атомная» парадигма Демокрита и «стихийная» Платона-Аристотеля, затем – идея создания парадигмы Аристотеля «вещь – основа бытия»: «первоматериал – энергия – интеллект – форма – вещь», которая до сих пор не получила необходимого развития применительно к современным условиям получения «вещи». Продолжала существовать и алхимическая идея. Первая научная парадигма «нового времени» Д. И. Менделеева «состав элементов – свойства» (см. рис. 4) и была признана только в 1869 году, алхимическая же идея – трансмутация вещества –

была впервые реализована в 1919-м Резерфордом, который выполнил первое искусственное превращение элементов (азота в кислород). Таким образом, первыми парадигмами в истории развития научных знаний о структуре материи и материала были последовательно познавательно-практические парадигмы Демокрита, Аристотеля, и их имена следовало бы внести в «Список». В своё время В. Гейзенберг сказал [1]: «Мне в голову не могло прийти видеть в естествознании и технике нашего времени мир, принципиально отличный от философского мира Пифагора или Евклида». Нам же, в свою очередь, и в голову не приходит мысль, что без идей инкубационного периода, рождённых древнегреческими мыслителями Демокритом, Аристотелем, Феофрастом, Левкиппом и идей парадигмального подхода научного периода русских учёных М. В. Ломоносова, Д. И. Менделеева, П. Г. Соболевского, Д. К. Чернова, Н. С. Курнакова, В. И. Вернадского, Б. С. Балакшина, И. В. Тананаева, Г. В. Самсонова, В. И. Коптюга, А. Д. Верхотурова (см. рис. 3) можно было бы рассматривать становление и развитие науки о материалах.

Научный период был ознаменован появлением идей парадигмального подхода в науке о материалах, в котором первой была научная парадигма Д. И. Менделеева (см. рис. 4). Второй стала научная парадигма Д. К. Чернова «структура→свойства» (см. рис. 4). Идея второй парадигмы закладывалась в первых работах по исследованию под микроскопом структур металлов и сплавов (в том числе дамасской стали), выполненных П. П. Аносовым в 1831 году с использованием и разработкой травителей шлифов. Однако систематическая работа по изучению структуры сталей была выполнена Д. К. Черновым и позже Г. К. Сорби. Третьей общепризнанной парадигмой стала парадигма основателя физико-химического анализа Н. С. Курнакова «состав вещества→свойства» (см. рис. 4), но уже не элементов, а соединений.

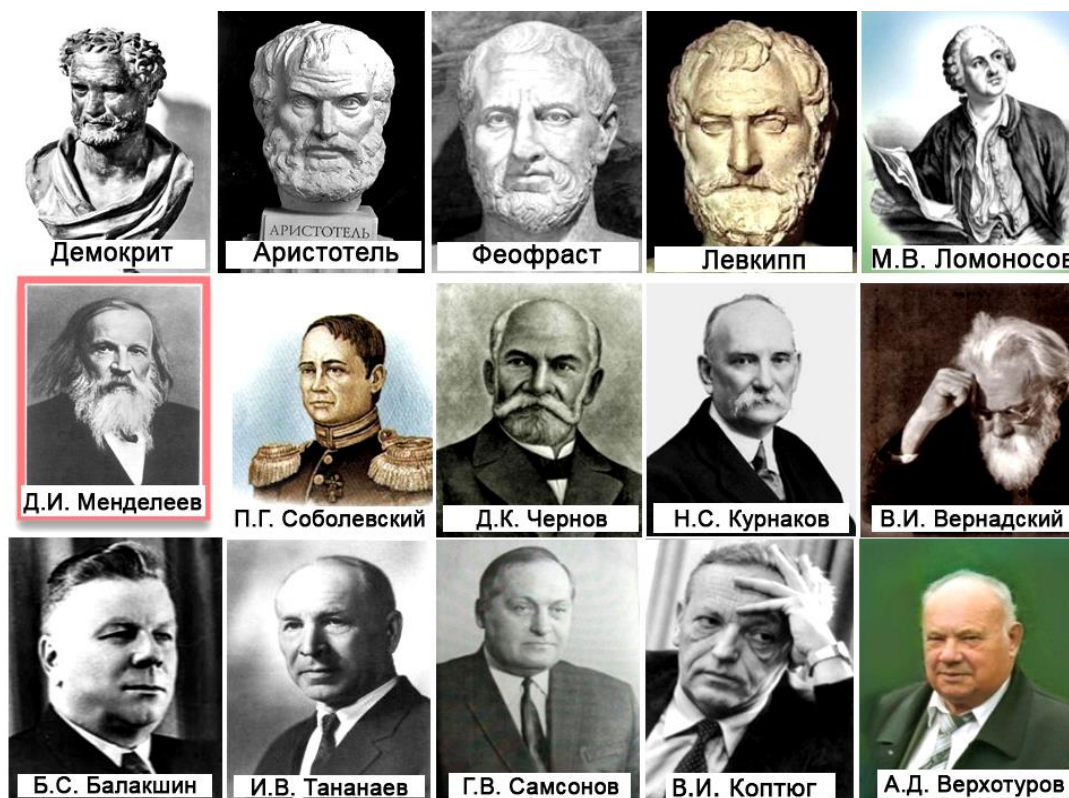


Рис. 3. Учёные, с именами которых связано появление научных парадигм и этапов в становлении и развитии науки о материалах

Появилось множество диаграмм состояний, позволяющих прогнозировать многие свойства соединений [20]. Детальное исследование железоуглеродистых сталей показало, что на их свойства значительное влияние оказывает микроструктура, кристаллическая и так далее. В 1939 году

академиком И. В. Тананаевым [22] была предложена очередная, трёхзвенная парадигма «состав→структура→свойства» (см. рис. 4), которая долгое время была основополагающей в материаловедении. Однако все предыдущие парадигмы были направлены на изучение веществ и материалов, на знания их потребительских свойств для практических нужд.

1.	Парадигма Менделеева: "Химический состав элементов-свойства"	1869 г.
2.	Парадигма Чернова-Сорби: "Структура-свойства"	1878 г.
3.	Парадигма Курнакова: "Состав вещества-свойства"	1906 г.
4.	Парадигма Тананаева: "Состав-структура-свойства"	1939 г.
5.	Парадигма Самсонова: "Состав-технология-структура-свойства"	1975 г.
6.	Парадигма нового этапа НМ: "Функциональное назначение материала-состав сырья-технология $ЦКВМ=f(\Delta^*)$ -структура-свойства материала"	2006 г.

Рис. 4. Парадигмы в развитии науки о материалах

К 1970-м годам резко обозначился вопрос не только изучения материалов и повышения их свойств, но и создания технологий получения принципиально новых материалов, решение которого было показано новой и последней парадигмой материаловедения члена-корреспондента Г. В. Самсонова [18]: «состав→технология→структура→свойства» (см. рис. 4). Следует заметить, что ещё в трудах М. В. Ломоносова прослеживается использование идеи этой парадигмы [13], но поднять её до уровня общепринятой парадигмы удалось Г. В. Самсонову. Парадигма Г. В. Самсонова ознаменовала собой заключительный этап в развитии материаловедения и явилась базой нового этапа в развитии науки о материалах – материалогии.

В развитие парадигмы Г. В. Самсонова в Институте материаловедения ХНЦ ДВО РАН была предложена новая парадигма нового этапа в развитии науки о материалах: «Функциональное назначение материала изделия→состав исходного сырья→технология  $ЦКВМ$ →структура→свойства» (см. рис. 4) [9]. При этом благодаря трудам крупного русского учёно-машиностроителя доктора технических наук Б. С. Балакшина (см. рис. 3) [2], в формулировке парадигмы материалогии как нового этапа в развитии науки о материалах появился признак функционального (служебного) назначения материала, изделий, средств деятельности, включая методологию [5] в уточнениях этого признака. Появление нового, материалогического этапа в развитии науки о материалах связано с учётом энтропийно-экологического фактора [7] и с именами других русских учёных, в их числе А. П. Александров, В. И. Трефилов, Н. М. Жаворонков, Я. Д. Вишняков, Е. И. Богданов, Ю. В. Цветков, Ф. Д. Ларичкин, Б. А. Воронов. С появлением нового этапа предполагается использование новых технологий, не создающих глобальных проблем человечеству, решение которых способствует объединению многих наук в единую науку о материалах, учитывающую энтропийно-экологический фактор. Новая парадигма должна охватить все науки о материалах (или их разделы) в одну, способную объединить теорию и практику создания материалов с заданными свойствами и средств деятельности из них (см. рис. 5). Цепочка «дуги Ломоносова» [16] от геологии, горного дела, минералогии и кристаллографии до металлургии является основой её формирования.



Рис. 5. Объединение ряда наук о материалах решением экологических проблем биосферы

В настоящее время наука о материалах требует изменения вектора не только её развития, но и всей науки [6]. Объектом исследования материаловедения дополнительно стало исходное минеральное, растительное сырьё и отходы, формирование её новых разделов [11]: материаловедения поверхности, объёмных материалов, минералогического, отходов, энтропийно-экологического и т. д. В последнем изучается получение материалов и средств деятельности с учётом производственно-экологического циклического круговорота вещества и материалов (ЦКВМ) во «второй природе», как её называл Цицерон, природе, преобразованной и творимой руками человека. На современном этапе заключительным звеном преобразования материалов в требуемые средства деятельности является машиностроение, и ему должны быть подчинены все предыдущие звенья ЦКВМ [9].

С учётом списка-100 и парадигмального подхода к науке необходимо, по нашему мнению, дополнительно отметить, что имя Д. И. Менделеева в развитии науки о материалах следует вписать рядом с именами таких великих мыслителей, как Демокрит, Аристотель, Феофан, Левкипп, М. В. Ломоносов и других; работа над списком должна быть продолжена. Появление в этом списке имени Д. И. Менделеева было обусловлено созданием периодического закона химических элементов – главного дела его жизни. Открытие Д. И. Менделеева – величайшее обобщение эмпирического материала в химии со дня её основания, и значение научного подвига Д. И. Менделеева, навеки обессмертившего его имя, всё больше осознаётся человечеством.

### Д. И. Менделеев – великий мыслитель и патриот нашей страны

К существующим проблемам России, которые необходимо было решать в интересах её народа, чтобы подняться до уровня передовых европейских стран, Д. И. Менделеев обращался ещё до увольнения из Петербургского университета. Чтобы поднять этот вопрос и привлечь к нему внимание думающих людей, он после увольнения из университета издавал газету «Подъём», в которой освещал пути «подъёма» возрождения России, её культуры и промышленности во благо народа. На первом заседании Общества для содействия развитию заводского дела в России в 1882 году он выступил с докладом «Об условиях развития заводского дела в России», в котором сказал следующее: «Россия уже вошла в круг производств, участвующих в деле общего развития человечества. Замереть России – гибель. Её удел поэтому – всё двигаться вперёд. Ведь только независимость экономическая есть независимость действительная – всякая прочая есть фиктивная, воображаемая» [17]. Менделеев страстно мечтал поднять на более высокую ступень отечественную науку, образование, промышленность, сельское хозяйство, благосостояние народа и его культурный уровень. Как говорил С. Ю. Витте, «вопрос о значении промышленности в России ещё не был оценён и понят. Только наш великий учёный Менделеев... вопрос этот понял и постарался просветить русскую публику» [8]. По нашему мнению, этот вопрос до сих пор так и не понят и не осознан нашим правительством. Можно удивляться прозорливости мыслей Д. И. Менделеева: «Без светоча науки и с нефтью будут потёмки» [21]. Его мысли о развитии нашей страны блестяще изложены в его книгах «Заветные мысли» (1904) [14] и «К познанию России» (1906) [15]. В «Заветных мыслях» он писал, что предметами просвещения должны быть промышленное производство и управление преимущественно ради «блага народного, ...а потому в предлагаемой книге желающие найдут мои ответы на все указанные требования протекционизма, понимаемого в том смысле, который диктуется началами, лежащими в основе государственности, национализма, блага народ-

ного». В «Заветных мыслях» Менделеев обозначал неразрывно связанные направления развития России, отставание в любом из которых грозит ей всеобщим отставанием в образовании, науке, промышленности, правительственной системе.

### **В образовании и науке**

В «Познании России» [15] Д. И. Менделеева занимают вопросы образования, преимущественно высшего: «В жизни мне пришлось многое узнать лично на месте и увидеть те препятствия, которые мешают надлежащему широкому развитию русской промышленности. Общий вывод в этом отношении мой тот, что наша образованность не в ту сторону направлена, в которую ей должно направляться, и что направленная, начиная с высших учебных заведений, в правильную сторону, она может быстро повернуть всё дело к коренным улучшениям... Конечно, не только живёт ещё остаток от прежнего времени расцвета русского образования, но есть и между новыми учащими и учащимися некоторый процент таких, которые понимают, что дело политики ни под каким видом нельзя смешивать с делом обучения... поэтому стремиться к так называемому “всеобщему обязательному образованию”, то есть к бесплатному обучению всех детей, не могущих получить на свои средства начального образования, должно всемерно, но пути к этому одни: надо сперва увеличивать условия накопления достатка в народе (чтобы – без особых налогов – стремились учиться и могли это выполнять) и постепенно готовить хороших учителей для элементарных, или народных школ». При этом Д. И. Менделеев подчёркивал связь правительственного, промышленного и просветительного направлений в образовании. Он отмечал, что «в стране с неразвитой или первобытной правительственной машиной и промышленностью нет спроса для истинного образования, особенно высшего, и там, где господствует вялость и формализм, самостоятельные специалисты с высшим образованием не находят деятельности в общественных и государственных сферах». Надо отметить, ничего не изменилось с тех пор, как Менделеев написал эти строки. Он утверждал, что человек с высшим образованием и самостоятельными суждениями будет важен и востребован только тогда, когда в нём будет нуждаться правительство или промышленность, или образованное общество, «а иначе он лишний». Менделеев отмечал, что образование «достигается только трудом, и очень долгим, и даётся только немногим к нему способным. В связи с этим лица, его получившие, должны пользоваться преимуществами, или, если угодно, привилегиями». «Преимущества, или привилегии, достигаемые высшим образованием, конечно, зовут к себе многих, и никакому сомнению не подлежит, что многие из жаждущих – не образования, а привилегий, им доставленных, не в силах вынести на своих плечах обязанности служить тем или иным путём для общественных и государственных целей», – подчёркивал учёный. По нашему мнению, Д. И. Менделеев сегодня не смог бы даже представить, что до сих пор «высшие учебные заведения готовят таких практических деятелей, особенно нужных в настоящее время России, которые зачастую не любят своего дела, плохо понимают русские местные потребности и не умеют их изучить сколько-нибудь самостоятельно и разумно к ним приноровляться» [15]. Он удивился бы, что диплом о высшем образовании можно купить, что наиболее востребованными специалистами станут адвокаты и экономисты (признак ослабления государства), но востребованные в чиновничьих кругах, создающих условия «пилить» госбюджет и общественную собственность.

Важнейшими практическими следствиями образования Д. И. Менделеев считал [14]:

- доступность высших учебных заведений: «Высшие учебные заведения должны быть доступны для всех подготовленных к восприятию тех специальностей, для которых они назначаются... без ограничения»;

- забота правительства не только об учреждении, но и содержании учебных заведений: «Не только учреждение, но и содержание учебных заведений и их организация должны составлять одну из первейших забот правительства», «правительство, заботящееся о будущем народной, должно открывать и вызывать высшие учебные заведения, вовсе не следует того, чтобы оно могло руководить ими во всех их отправлениях», «нужны профессора-специалисты, которые одни могут влиять на юношество так, как должно по вышеизложенному, то есть подводить их к самому алтарю знания»;



- расширение, а не уничтожение существующих узкоспециализированных высших учебных заведений: «Ввиду громадного расширения потребности в высшем образовании, нет никакой надобности уничтожать существующие узкоспециализированные высшие учебные заведения, а есть только надобность в расширении», «и если Россия желает избежать следствий возгласа “горе отсталым”, необходимо “вызвать современными заботами о получении высших специалистов-профессоров, что за последнее время совершенно упущено из виду”»;

- подготовка профессоров, самостоятельных русских сил: «В десятый раз повторю затем, что весь успех дела будет зависеть от профессоров, и, не обинуясь, скажу, что больше всего и первее всего надо позаботиться о том, чтобы подготовить таких лиц... По отношению к месту, пригодному для обсуждаемого высшего учебного заведения и так удалённому от столиц, чтобы в нём могли слагаться самостоятельные русские силы, скажу только то, что, по моему мнению, его надобно искать вблизи географического центра России».

### **В производстве**

Дмитрий Иванович Менделеев не сомневался, что надо развивать производство: «Малопомалу Россия, особенно быстро после освобождения крестьян, входит в тот разряд стран, в котором промышленные отношения становятся на первом месте и во главу “блага народного”, начиная с торговли, с добычи хлеба не только для себя, а для продажи, с перевозки, с горного дела и всяких ремесленных и фабрично-заводских дел». «Но как мы далеки ещё от среднего уровня тех стран, с которыми хотим и, наверное, можем равняться, становится видным уже из того, что вся сумма ценности нашего фабрично-заводского производства едва превосходит 3 млрд р. До заработков испанских или итальянских, потом до немецких, французских и английских, а тем паче до американских, нам очень далеко» [14].

Сегодняшние же чиновники-временщики довели страну до резкого сокращения промышленного производства, которое в значительной степени было разрушено. Менделеев называл таких чиновников «обвиняемыми», «виновными», что они «появляются у нас при наших нравах». Подобно М. В. Ломоносову [16], Д. И. Менделеев писал: «Этих главных виновных я ничуть не хочу осудить, потому что они плод нашей истории» [14], а перспективы развития промышленности России обнадеживающие: «Мы можем, коли хорошо сумеем да хорошо захотим». При этом Д. И. Менделеев говорил, что «нам следует отправлять за границу сырьё – и ископаемое и растительное (нефть, уголь, лес, лён, хлопок, зерно и т. п.), но – только в переработанном виде... Добывать только сырьё – значит отказаться от сливок, довольствуясь снятым молоком, потому, что и его отправка, переделка и обработка требуют труда не меньшего, чем сама добыча сырья» [14]. «Торговец должен уметь найти сбыт всему тому, что может производить страна, а через этот сбыт должен возбуждать внутреннее производство. Торговцы находят сбыт и для никому, по-видимому, ненужных японских товаров, и для избытка апельсинов, производимых некоторыми странами, а у нас почти всё избыточное, но всюду спрашиваемое, вроде хлеба, яиц и масла, скупается не по нашей инициативе для заграничного вывоза, а присланными оттуда агентами, умеющими попутно сбывать нам немало товаров, которые мы могли бы производить дома. И вот эта-то сторона дела в России чрезвычайно мало развита» [15]. Он пишет: «Вся моя книга сводится к тому, чтобы убедить в необходимости широкого роста русской промышленности» [14]. Менделеев доходчиво пояснял: «Преобладание промышленников составляет сущность современной эволюции, предвестник предстоящего и то, чего многие даже из передовиков у нас ещё не поняли» [15]. «Это естественный, новый плод умножения народонаселения, знаний, потребностей и достатков. Пока этого не поймут – старая чепуха неизбежно будет повторяться. Если наша Государственная дума и всё правительство хотят добра народу, а себе вечной славы, они должны понять эти новые начала и положить их в основу своих действий и усиленно – всякими законами – покровительствовать расцвету промышленности. Социалисты тут кое-что увидели и даже отчасти поняли, но сбились, следуя за латинщиной, рекомендуя прибегать к насилиям, потворствуя животным инстинктам черни и стремясь к переворотам и власти» [15].

Размышляя о социальном устройстве в «Познании России» [15], Д. И. Менделеев сделал пророческий вывод: «Следствия социализма очевидны: застой и неизбежность порабощения но-

выми, или свежими народами, чуждыми утопических увлечений социалистов; для них общее благо низводится исключительно для сытости... Поэтому и не могу не высказаться, заметив, – без всяких уступок и в явном противоречии с социалистами, коммунистами и всякими иными политиканствующими, – что суть дела, по мне, вовсе не в общественно-политических строях и передрягах, а в таком явном умножении народонаселения, которое уже не укладывается в прежние сельскохозяйственно-патриархальные рамки, создавшие мальтусов и требующие войн, революций и утопий». Далее, в отношении к капитализму он писал: «Капиталом является только та часть богатства, которая обращена на промышленность и производство, но не на спекуляцию и перепродажу». Далее: «Надо вновь обратить внимание, во-первых, на то, что возбуждению русской передельвающей промышленности, если она разовьётся правильно и широко без постоянных перерывов и сомнений, должен ответить вывоз части продуктов, производимых промышленностью, за границу, что и поправит баланс страны... Количеством труда, то есть количеством произведённых полезностей и всего спрашиваемого людьми определяется и чем дальше, тем больше будет определяться весь достаток людей, всё их так называемое богатство и весь их капитал, который есть не что иное, как результат произведённого труда». Следствием «неправильного» капитализма Менделеев считал ухудшение условий жизни простого народа. Он писал: «Для добычи капиталов, промышленности надобных и могущих прийти, хотя отчасти через правительство, ни под коим видом я не рекомендую увеличивать прямые и косвенные налоги. Дел промышленных мешать не следует в одну кучу с теми делами (войско, администрация, дипломатия, образование, суд и т. п.), ради которых подати и налоги уплачиваются; промышленность (а в том числе, по мне, не только дороги и торговля, но и земледелие) должна сама себя дозвать, основываться, содержать и свои начальные займы оплачивать». Далее: «Для меня высшая или важнейшая и гуманнейшая цель всякой «политики» яснее, проще и осознательнее всего выражается в выработке условий для размножения людского». И многократно повторял, «что в основу всего должно положить вопрос об умножении народонаселения. С него непременно должно начинать». Он писал: «Я уже в своих “Заветных мыслях” ставлю вопросы о народонаселении на первый план между всеми другими внешними вопросами человеческого общения и полагаю, что не только наука, но и политика, даже религия и понятия о прекрасном должны поставить задачу народонаселения на первейший план. Её забвение составляет одну из ошибок мышления, которая, по моему мнению, объясняет немалое число мировых погрешностей... С течением времени, когда поразбогатеет и когда вывозить станем не тот хлеб, который надобен своему же народу, придёт, быть может, время для уместности подоходного налога...». Затем: «Предложение же подоходного налога для введения сельскохозяйственных улучшений (что делали не раз) должно считать простым недомыслием или недоразумением».

**В правительственной системе** Д. И. Менделеев был озабочен задачей «как достичь того, чтобы между членами Государственной думы преобладали, по возможности, люди, любящие Россию, в её будущность верящие и способные ту любовь отстаивать, умом поддерживать. Задача та сложная и опытным путём – по примерам других народов – мне кажется, ещё далеко не решённая с ясностью» [14]. Надо сказать, эта задача не решена в России до сих пор. Ещё до Д. И. Менделеева М. В. Ломоносов [14] отмечал важнейшую проблему для России – увеличение народонаселения. Дмитрий Иванович по этому вопросу писал: «Для всех стран важно увеличение народонаселения, а для России его значение, по моему мнению, стоит на первейшем плане» [14]. «Для меня высшая или важнейшая и гуманнейшая цель всякой политики яснее, проще и осознательнее всего выражается в выработке условий для размножения людского» [15]. В работе правительства Д. И. Менделеев видел массу недостатков: «Мне недостаёт умения в доказательстве того, что высшей функцией правительства должно считать заботы о просвещении народа и его промышленного развития, но я твёрдо знаю, что это составляет моё заветное убеждение» [14] (в ответ на заветные мысли Д. И. Менделеева нынешние правительственные чиновники делают, по моему мнению, всё наоборот). В «Заветных мыслях» много внимания Менделеев уделял отношениям России с Китаем: «Союз России с Китаем будет предтечей общего мирного союза уже по той причине, что в нём было бы более всех людей, и он не мог бы быть иным как чисто мирным и охраня-



тельным. Думаю, что служа в некотором смысле противовесом англо-японскому союзу, русско-китайский не только послужит не менее первого делу мира в Азии, но положению обоих союзников в Европе» [14]. Он советовал: «Так, ничего не желая, надо тотчас приступить на берегах Тихого океана к своему военному судостроению, к получению местной стали, своих пушек, своего каменного угля... Государственная дума не выполнит свои задачи, если не выскажется в этих делах категорически, потому что жизненное и абсолютнее дел этого рода найти трудно» [14]. Да и «Ледовитый океан должен обратить на себя русское внимание, как я старался доказать это выше» [15]. Дмитрий Иванович Менделеев предлагал программу справедливых выборов в Государственную думу, в которую должны входить люди, у которых «есть мысль о “благое народном” и желание довести нашу страну до уровня более высокого, чем современный. Дело общее для всех нас, и только через это посредство оно входит и войти может в круг дел правительственных» [14]. Весьма правильное наставление Менделеева и для современного правительства страны.

В противоположность современному направлению чиновнических установок Д. И. Менделеев писал в [15], что «государственное единство прежде и больше всего определяется господствующей народностью, которая выражается яснее всего в принадлежащем ей языке». «Разъединять, как чаще всего делается на картах, Европейскую Россию от Азиатской представляется во многих смыслах неправильным, особенно же вследствие того единства русского народа (великороссы, малороссы и белорусы), который явно преобладает во всём населении страны»; «Сколько я понимаю русскую историю, русский народ никогда не был склонен к завоевательству и если воевал и покорил немало народов, то лишь потому, что к этому принуждали его прямо слагавшиеся обстоятельства». «Россия, взятая в целом, думается мне, доросла до требований свободы, но не иной, как соединённой с трудом и выполнением долга. Виды и формы свободы узаконить легко прямо статьями, а надо ещё немало поработать мозгами в Государственной думе, чтобы законами поощрять труд и вызывать порывы долга перед Родиной». Эти наставления актуальны сегодня для современного правительства и Думы.

В последние годы жизни Д. И. Менделеев всё больше размышлял над своей многолетней научно-исследовательской, производственной деятельностью, углубляясь к сущности и особенностям развития современной и будущей эпохам, при этом он всё время обращался к социально-философской публицистике. После своих эпохальных научных достижений Д. И. Менделеев как истинный патриот России всё более и более занимался осмыслением её исторического пути. Он думал о возможности превращения её из аграрной страны в страну с высокоразвитой промышленностью и эффективным сельским хозяйством на основе достижений науки, а также превращения из страны с сырьевой экономикой в страну промышленного производства. Его забота о просвещении, высшем образовании была одним из основных стратегических направлений деятельности во благо России. Однако поставленные Дмитрием Ивановичем проблемы и пути их решения даже сегодня не только не выполняются в нашей стране, но зачастую решаются чиновниками во вред, в прямо противоположном направлении.

О славе нашей страны страстно мечтал Д. И. Менделеев. Сегодня он поразился бы многим решениям правительственных чиновников, направленным против интересов русского народа. Он был революционером в науке о материалах, совершил научный подвиг, обессмертивший его имя. С течением времени всё ярче светят творения Д. И. Менделеева, его труды вдохновляют и указывают направления деятельности не только в науке, но и в образовании, промышленности, государственных делах. Менделеев, как бы предвидя сегодняшнее разграбление национальных богатств страны олигархическим руководством, вывоз капитала, разрушение промышленности, образования и науки говорил, что величие России может быть только при организации правильной правительственной системы, развитии промышленного производства, просвещения и науки, отвечающим национальным интересам и национальной идее страны.

### **Некоторые цитаты и изречения Д. И. Менделеева актуальны и сегодня:**

1. «Посев научный взойдёт для жатвы народной».
2. «Без светоча науки и с нефтью будут потёмки».
3. «Наука есть дело вольное и совершенно свободное».

4. «Сжигать нефть – всё равно, что топить печку ассигнациями».
5. «Нет без явно усиленного трудолюбия ни талантов, ни гениев».
6. «Вся гордость учителя в учениках, в росте посеянных им семян».
7. «Границ научному познанию и предсказанию предвидеть невозможно».
8. «Все даётся только труду. Всё – труду людскому, таков лозунг истории».
9. «Роль наук служебная, они составляют средство для достижения благ».
10. «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять. Точная наука немыслима без меры».
11. «Суеверие есть уверенность, на знании не основанная. Наука борется с суевериями, как свет с потёмками».
12. «Национализм во мне столь естественный, что никогда никаким интернационалистам меня из него не выбить».
13. «Человек тем более совершенен, чем более он полезен для широкого круга интересов общественных, государственных и всего человечества».
14. «Законную степень народной гордости, составляющую принадлежность любви к отечеству, должно глубоко отличать от кичливого самообожания».
15. «Необходимо, чтобы годовое потребление древесины не превышало её годового прироста, ибо тогда потомкам останется столько же, сколько получено нами».
16. «Законную степень народной мудрости, составляющую принадлежность любви к отечеству, должно глубоко отличать от кичливого самообожания: одно есть добродетель, а другое – порок или зло, задерживающее движение прогресса».
17. «Наука есть достояние общее, а потому справедливость требует не тому отдать наибольшую научную славу, кто первый высказал известную истину, а тому, кто сумел убедить в ней других, показал её достоверность и сделал её применимой в науке».
18. «Справедливо считать творцом научной идеи того, кто не только признал философскую, но и реальную стороны идеи, который сумел осветить вопросы так, что каждый может убедиться в её справедливости, и тем самым сделал идею всеобщим достоянием».
19. «Я ставлю вопросы о народонаселении на первый план между всеми другими внешними вопросами человеческого общения и полагаю, что не только наука, но и политика, даже религия и понятия о прекрасном должны поставить задачу народонаселения на первейший план».
20. «К педагогическому делу надо призывать, как к делу морскому, медицинскому или тому подобным не тех, которые стремятся только обеспечить свою жизнь, а тех, которые чувствуют к этому делу и к науке сознательное призвание и предчувствуют в нём своё удовлетворение, понимая общую народную надобность».
21. «Работая на пользу всемирной науки, мы, конечно, вносим свою дань Родине. Но ведь у неё есть нужды личные, местные... Будем же их сознавать, чтобы не сказали когда-нибудь: “они собирались, обсуждали всемирные интересы науки, а близкого, знакомого, в чём могли оказать прямую пользу стране, – того не видели...”».

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ахутин, А. В. Вернер Гейзенберг и философия. Книга В. Гейзенберга «Физика и философия. Часть и целое» / А. В. Ахутин. – М.: Наука, 1989. – С. 363-394.
2. Балакшин, Б. С. Основы технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1969. – 358 с.
3. Верхотуров, А. Д. Материалогия / А. Д. Верхотуров // Вестник ДВО РАН. – 2004. – № 5. – С. 80-86.
4. Верхотуров, А. Д. Основы материалогии. Т. 1: моногр. / А. Д. Верхотуров, А. М. Шпилев, А. И. Евстигнеев. – Владивосток: Дальнаука, 2012. – 270 с.
5. Верхотуров, А. Д. Метод как основа новой парадигмы материаловедения / А. Д. Верхотуров, Б. Я. Мокрицкий, Д. А. Пустовалов // Научно-технический журнал «Новости материаловедения. Наука и техника». – 2015. – № 1(13). – С. 1-14.
6. Верхотуров, А. Д. Избранные труды профессора А. Д. Верхотурова. В 2 т. Т. 1. Общие проблемы науки о материалах на современном этапе развития человеческой цивилизации. В. И. Вернадский и изменение вектора развития наук при переходе человечества из биосферы в ноосферу / А. Д. Верхотуров, Б. А. Воронцов, Л. А. Коневцов. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2016. – С. 28-40.



7. Верхотуров, А. Д. Энтропийно-экологическая материаловедение / А. Д. Верхотуров, Б. А. Воронов, Л. А. Коневцов // Экология промышленного производства. – 2012. – № 1. – С. 5-15.
8. Витте, С. Ю. Воспоминания. В 3 т. Т. 2 / С. Ю. Витте. – М., 1960. – 505 с.
9. К вопросу становления материаловедения (по материалам книги Р. Кана «Становление материаловедения»). Профессор А. Д. Верхотуров. Избранные труды и воспоминания. В 3 т. Т. 3. Материаловедение / А. Д. Верхотуров, А. Д., Шпилев, А. М., Евстигнеев [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВО «КнАГТУ», 2016. – С. 58-70.
10. Комаров, С. М. Календарь материаловедения / С. М. Комаров // Химия и жизнь. – 2006. – № 11. – С. 18-21.
11. Коневцов, Л. А. Производство материалов, экологические проблемы и материаловедение / Л. А. Коневцов // Физика бесвинцовых пьезоактивных и родственных материалов (анализ современного состояния и перспективы развития): труды VII Междунар. междисциплинар. молодежн. симпозиума. – Ростов-на-Дону, 20-24 сент. 2018 г. В 2 т. Т. 2. – Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2018. – С. 17-22.
12. Кун, Т. Структура научных революций / Т. Кун – М.: Изд-во «Прогресс», 1977. – 300 с.
13. Ломоносов, М. В. Полное собрание сочинений. В 11 т. Т. 4. Металлургия / М. В. Ломоносов. – СПб.: Изд-во Императорской Академии наук, 1803. – 294 с.
14. Менделеев, Д. И. Заветные мысли / Д. И. Менделеев. – СПб.: Типография М. П. Фроловой, 1903-1904. – 428 с.
15. Менделеев, Д. И. К познанию России / Д. И. Менделеев. – СПб.: Изд-во «А. С. Суворин», 1912. – 157 с. с прил. карты России.
16. Михаил Васильевич Ломоносов и современная наука о материалах / А. Д. Верхотуров, В. А. Достовалов, П. С. Гордиенко [и др.]. – Владивосток: Изд-во Дома Дальневосточного федерального университета, 2012. – 92 с.
17. Младенцев, М. Н. Дмитрий Иванович Менделеев: его жизнь и деятельность. Т. 1. / М. Н. Младенцев, В. Е. Тищенко. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1938. – С. 290.
18. Самсонов, Г. В. Электронная локализация в твёрдом теле / Г. В. Самсонов, И. Ф. Прядко, Л. Ф. Прядко. – М.: Наука, 1976. – 338 с.
19. Смит, С. С. Материалы. Современные материалы / С. С. Смит. – М.: Мир, 1970. – С. 9-20.
20. Соловьев, Ю. И. Николай Семёнович Курнаков: 1860–1941 / Ю. И. Соловьев. – М.: Наука, 1986. – 272 с.
21. Соловьев, Ю. Б. Д. И. Менделеев о путях развития России / Ю. Б. Соловьев // Вестник Российской академии наук, 2000. – Т. 70. – № 1. – С. 57-62.
22. Тананаев, И. В. Основные этапы развития неорганического материаловедения в СССР / И. В. Тананаев. – Киев: Наукова думка, 1983. – С. 8-29.
23. JOM'S The Greatest Moments in Materials' Science and Engineering // JOM. – 2006. – № 2. – P. 1-8.
24. Voting for JOM's Ten Greatest Materials Moments: Fact Sheet // JOM. – 2006. – № 9(26). – P. 1-9.