

## ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ

<i>Закриев И.Д., Радаев А.В., Сабирзянов А.Н., Салимьянов И.Т., Шавалеев И.И. Измерение динамической вязкости углеводородов, насыщенных сверхкритическим CO<sub>2</sub>, методом катящегося шарика .....</i>	<i>3</i>
<i>Попов И.А., Каськов С.И., Щелчков А.В., Степанова Ю.С., Аксянов Р.А. Теплообмен при кипении воды на горизонтальной микроструктурированной поверхности с полузакрытыми каналами.....</i>	<i>10</i>
<i>Радаев А.В., Сабирзянов А.Н., Васенева Н.А. Подобие процесса фильтрации систем «углеводород – сверхкритический флюид» в однородной пористой среде.....</i>	<i>16</i>

## МАШИНОСТРОЕНИЕ

<i>Галимов Э.Р., Шарафутдинова Э.Э., Галимова Н.Я. Разработка технологии получения углеродных пен карбонизацией пеков под давлением .....</i>	<i>23</i>
<i>Галимов Э.Р., Шарафутдинова Э.Э., Галимова Н.Я. Структура и теплофизические свойства углеродных пен, полученных карбонизацией пека в присутствии порообразователя.....</i>	<i>28</i>
<i>Етифанов В.В. Технологический классификатор деталей для выбора металлорежущего оборудования с ЧПУ в условиях серийного производства .....</i>	<i>31</i>
<i>Симонова Л.А., Садыков М.Ф. Формирование интегрированной информационной системы управления качеством на этапах жизненного цикла автотранспортных средств .....</i>	<i>36</i>
<i>Субаева А.К., Салахутдинов И.Р., Глуценко А.А., Стрельцов С.В., Замальдинов М.М. Технологический способ напыления электроизолирующего покрытия на внешнюю стенку гильзы цилиндров.....</i>	<i>41</i>
<i>Федяев В.Л., Беляев А.В., Федяев Р.В. Оптимальное управление запасами, минимизация издержек при эксплуатации складов машиностроительных предприятий.....</i>	<i>46</i>
<i>Шапарев А.В., Савин И.А. Анализ влияния различных факторов на технологию лазерной резки волоконными лазерами .....</i>	<i>52</i>
<i>Шарафутдинов Р.Р., Ван Фуюй, Александров Ю.Б. Проектирование колеса осевой ступени компрессора малогабаритного двигателя.....</i>	<i>58</i>

## ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

<i>Макаров В.Г., Вагапов Г.В., Несрин Н. Математическая модель управления беспилотным летательным аппаратом на основе ПИД-регулятора .....</i>	<i>68</i>
<i>Седов С.С., Щербакова Т.Ф., Шарипов Р.И. Определение параметров variability сердечного ритма по электрокардиосигналу для оценки состояния и адаптационных возможностей организма человека .....</i>	<i>81</i>
<i>Солдаткин В.М., Солдаткин В.В., Ефремова Е.С., Козловский Р.В., Козловский Г.В. Структурная схема, модели операторных чувствительностей и динамических погрешностей каналов системы измерения воздушных параметров движения летательного аппарата с фюзеляжным приемником параметров набегающего потока.....</i>	<i>85</i>
<i>Хусаинов Р.Р., Евдокимов Ю.К. Контроль и диагностика многофазных потоков: современные проблемы и применение нейросетевых технологий.....</i>	<i>93</i>
<i>Чумаров С.Г., Семенов В.И., Сас Д.Д. Улучшение точности реконструкции изображений с применением вейвлет-преобразования в частотной области.....</i>	<i>102</i>

## CONTENTS

---

### PHYSICAL SCIENCE

<i>Zakiev I.D., Radaev A.V., Sabirzyanov A.N., Salimyanov I.T., and Shavaleev I.I.</i> Measurement of the dynamic viscosity of hydrocarbons saturated with supercritical CO <sub>2</sub> by rolling ball method .....	3
<i>Popov I.A., Kas'kov S.I., Shchelchikov A.V., Stepanova Yu.S., and Aksyanov R.A.</i> Pool boiling heat transfer of water on a horizontal microstructured surface with semi-closed channels .....	10
<i>Radaev A.V., Sabirzyanov A.N., and Vaseneva N.A.</i> Similarity of filtration process of hydrocarbon – supercritical fluid systems in homogeneous porous medium.....	16

### MECHANICAL ENGINEERING

<i>Galimov E.R., Sharafutdinova E.E., and Galimova N.Ya.</i> Development of technology for producing carbon foam by carbonization of pitches under pressure .....	23
<i>Galimov E.R., Sharafutdinova E.E., and Galimova N.Ya.</i> Structure and thermophysical properties of carbon foam obtained by carbonization of pitch in the presence of a foaming agent.....	28
<i>Epifanov V.V.</i> Technological classifier of parts for the selection of CNC metal cutting equipment in mass production conditions .....	31
<i>Simonova L.A. and Sadykov M.F.</i> Formation of an integrated quality management information system at the stages of the life cycle of motor vehicles .....	36
<i>Subaeva A.K., Salakhutdinov I.R., Glushchenko A.A., Strel'tsov S.V., and Zamal'dinov M.M.</i> Technological method of spraying an electroinsulating coating on the outer wall of a cylinder liner .....	41
<i>Fedyaev V.L., Belyaev A.V., and Fedyaev R.V.</i> Optimal inventory management, cost minimization in operation of warehouses of engineering enterprises .....	46
<i>Shaparev A.V. and Savin I.A.</i> Analysis of the impact of various factors on laser cutting technology with fiber lasers.....	52
<i>Sharafutdinov R.R., Wang Fuyu, and Aleksandrov Yu.B.</i> Design of the axial rotor of a small-sized engine compressor stage.....	58

### ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT MAKING AND COMMUNICATIONS

<i>Makarov V.G., Vagapov G.V., and Nesrine N.</i> Mathematical model of control of unmanned aircraft based on PID regulator .....	68
<i>Sedov S.S., Shcherbakova T.F., and Sharipov R.I.</i> Determination of heart rate variability parameters using an electrocardiac signal to assess the state and adaptive capabilities of the human body .....	81
<i>Soldatkin V.M., Soldatkin V.V., Efremova E.S., Kozlovskii R.V., and Kozlovskii G.V.</i> Structural diagram, models of operator sensitivities and dynamic errors of channels of the system of measuring air parameters of motion of the aircraft with a fuselage receiver of the incidental flow.....	85
<i>Khusainov R.R. and Evdokimov Yu.K.</i> Monitoring and diagnostics of multiphase flows: modern problems and the use of neural network technologies .....	93
<i>Chumarov S.G., Semenov V.I., and Sas D.D.</i> Improving the accuracy of image reconstruction using the wavelet transform in the frequency domain .....	102

УДК 533.1

## ИЗМЕРЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ УГЛЕВОДОРОДОВ, НАСЫЩЕННЫХ СВЕРХКРИТИЧЕСКИМ CO<sub>2</sub>, МЕТОДОМ КАТЯЩЕГОСЯ ШАРИКА

**И.Д. Закиев, А.В. Радаев, А.Н. Сабирзянов, И.Т. Салимьянов,  
И.И. Шавалеев**

Проведен обзор существующих методов измерения динамической вязкости углеводородов и их смесей при различных давлениях и температурах. Разработана методика измерения динамической вязкости углеводородов, насыщенных сверхкритическими флюидами системами. Предложено уравнение для расчета динамической вязкости турбинного масла, насыщенного природным газом, на основании экспериментальных данных по плотности жидкости и времени качения шарика. Для измерения динамической вязкости углеводородов, насыщенных сверхкритическим флюидом, применялся метод катящегося шарика. На экспериментальной установке проведены пробные опыты по измерению динамической вязкости смеси турбинного масла с природным газом давлением до 40 МПа на изотерме 333 К. Приведен материальный баланс по сверхкритическому флюиду и углеводороду, который позволяет рассчитать массовую долю природного газа в турбинном масле. Проведен расчет неопределенности и среднеквадратичного отклонения полученных результатов от литературных данных.

**Ключевые слова:** сверхкритический флюид, вискозиметр, динамическая вязкость, метод катящегося шарика.

Цель исследования заключается в получении новых экспериментальных данных по динамической вязкости системы «углеводород – сверхкритический флюид», а также сверхкритического флюида со смесью углеводородов.

Научная значимость исследований заключается в получении новых экспериментальных данных по динамической вязкости системы «углеводород – сверхкритический флюид», практическая значимость – в получении результатов, которые будут использоваться при составлении материальных балансов для формирования технологических рекомендаций при проектировании нефтяных месторождений.

В настоящее время для измерения динамической вязкости углеводородов в основном применяются капиллярный метод, метод падающего груза и вибрационный метод вискозиметрии. Так, в работах [1, 2] капиллярным методом и в работах [3–5] методом падающего груза измерена динамическая вязкость ряда газов, а в работах [6, 7] гексадекана [8], нормального декана [8], рапсового масла [9]. Результаты измерения динамической вязкости углеводородов и их смесей при нормальных условиях приведены в работах [10, 11], при высоких значениях параметров состояния – в работе [12]. Динамическая вязкость смеси углеводородов, насыщенных азотом и кислородом при высоких давлениях, измерялась в работе [13]. Анализ результатов работы показал, что динамическая вязкость углеводорода, насыщенного газом, снижается. Однако экспериментальных данных по динамической вязкости систем «углеводород – сверхкритический флюид» мало. Например, в работе [14] проводилось измерение динамической вязкости турбинного масла с природным газом при давлениях до 60 МПа и температурах до 373 К.

Схема экспериментальной установки для измерения динамической вязкости углеводородов и их смесей, насыщенных сверхкритическими флюидами, методом катящегося шарика на приведена рис. 1 [15]. Здесь обозначены следующие системы и узлы: I – система нагнетания флюида; II – система термостатирования; III – система поддержания флюидонасыщенности углеводорода; IV – система задания, поддержания и измерения давления; V – система измерения объема газа в углеводороде; 1 – баллон с CO<sub>2</sub>; 2–6 – манометры; 7 – газовый расходомер; 8 – емкость измерения объема жидкости;

9 – емкость мерная для газа; 10 – ячейка рекомбинирования; 11, 15 – терморубашка; 12 – насос вакуумный; 13 – ловушка жидкостная; 14 – сосуд равновесия; 16 – газометр; 17 – сепаратор; 18 – вискозиметр высокого давления; 19 – емкость напорная; 20 – пресс для создания измерения давления в сосуде равновесия; 21 – емкость промежуточная; 22 – емкость маслонасоса; 23 – насос высокого давления; 24–60 – вентиль запорный.

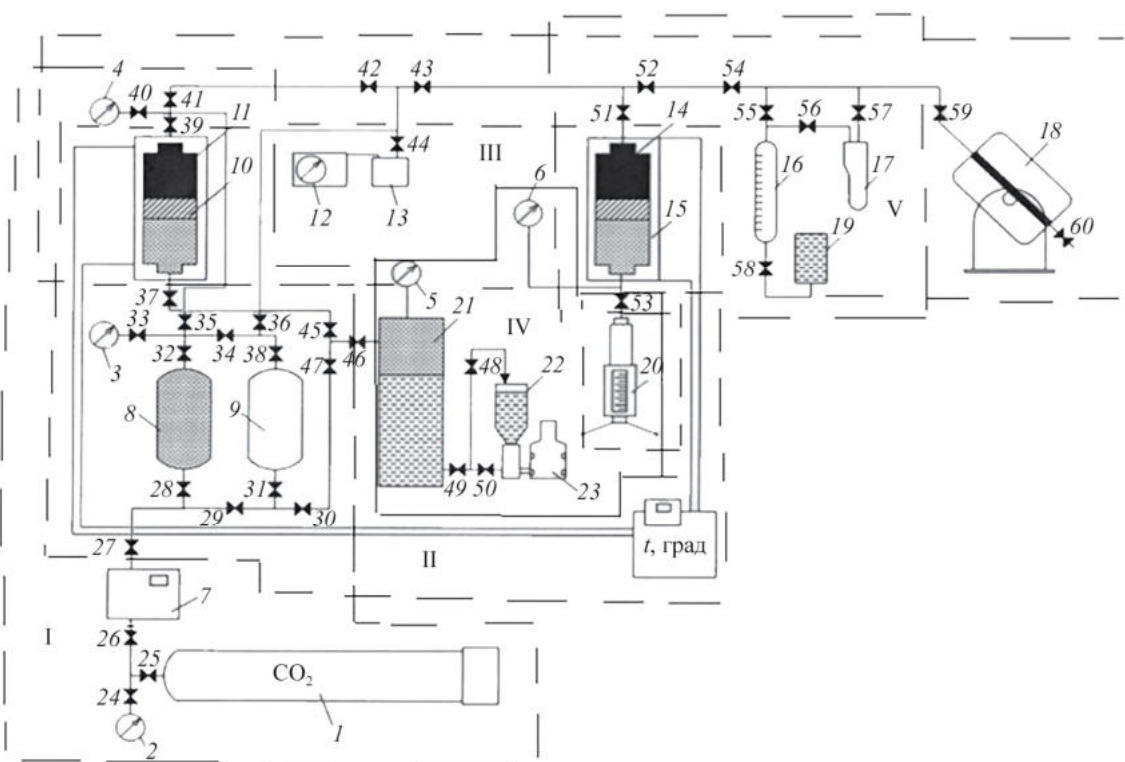


Рис. 1

Экспериментальная установка разработана для измерения динамической вязкости флюидо-насыщенных углеводородов при давлениях до 40 МПа, температурах до 373 К.

Вискозиметр представляет собой прибор, включающий измерительную ячейку и электронный блок управления для контроля процесса измерения и обработки данных.

На рис. 2 приведена схема вискозиметра. Здесь: 1 – постоянный магнит; 2 – датчик магнитного поля; 3 – шарик; 4 – пружина; 5 – упор.

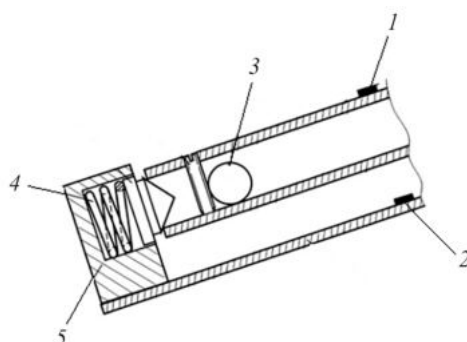


Рис. 2

Измерительная ячейка имеет термостатирующий корпус с патрубками для подключения к жидкостному термостату. Для замеров температуры в корпусе измерительной ячейки имеется отверстие для установки термометра с пробкой. Измерительная ячейка выполнена в виде металлического корпуса, шарнирно закрепленного на основании.

Перед началом эксперимента к вискозиметрическому сосуду подключают заземление. После подключения вискозиметрического сосуда к сети осуществляется его нагрев в течение 4–5 ч. Температура внутри вискозиметрического сосуда контролируется с помощью датчика температуры (медь – константановые термодпары). Внутри тубуса находится калиброванная трубка, заполненная исследуемой жидкостью, по которой прокатывается шарик. Снаружи трубки на одном ее конце расположен электромагнит, на другом сигнальная катушка. В исходном состоянии шарик удерживается электромагнитом, а тубус устанавливается на определенный угол. В момент выключения электромагнита включается секундомер, и шарик начинает прокатываться по наклонной трубке. При достижении противоположного конца трубки, на котором установлена сигнальная катушка, секундомер останавливается. Динамическая вязкость углеводорода, насыщенного сверхкритическим флюидом, определяется измерением времени качения стального шара по калиброванной трубке в соответствии со следующим уравнением:

$$\mu = \tau(\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ж}})K, \quad (1)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость, мПа·с;  $\tau$  – время качения шарика, с;  $\rho_{\text{ш}}$  – плотность шарика, г/см<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости внутри калиброванной трубки, г/см<sup>3</sup>;  $K$  – постоянная вискозиметра.

Постоянная вискозиметра  $K$  зависит от угла наклона вискозиметра и выбирается в зависимости от размеров трубки и шарика. Перед проведением эксперимента осуществляется калибровка вискозиметра жидкостью, вязкость которой известна. С этой целью трубку вискозиметра заполняют эталонной жидкостью и электронным секундомером измеряют время качения стального шара внутри трубки от одного ее конца к другому концу. В качестве эталонных жидкостей используют ГСО РЭВ-10-ЭК, РЭВ-30-ЭК, РЭВ-100-ЭК, РЭВ-1000-ЭК. Измерения проводят при трех значениях угла наклона вискозиметра: 15, 30, 45°. Среднее время качения шарика определяется как среднее между пятью определениями.

Перед началом эксперимента задают температуру внутри ячейки рекомбинирования и сосуда равновесия. Регулирование температуры происходит с использованием термостата, который изменяет температуру внутри терморубашки обоих сосудов.

В начальном положении вентили 28–60 закрыты. Сохраняя закрытыми вентили, плунжер измерительного пресса переводят в крайнее верхнее положение, открывают вентили 32, 35, 41, 49 и начинают заполнять исследуемым углеводородом «мертвый объем» ячейки рекомбинирования, а затем и саму ячейку. Для равномерного распределения углеводорода внутри ячейки плавно открывают вентили 37, 45, 46 и включают насос высокого давления, поддерживая, таким образом, необходимое значение давления внутри ячейки. Затем закрывают вентиль 46, отсекая, таким образом, от системы насос высокого давления, и к системе III подсоединяется система нагнетания флюида I, которая состоит из насоса высокого давления, криотермостата и массового расходомера. После этого открывают вентили 24–27, 29, 30, 37, 45, 47, и исследуемый газ с заданным расходом поступает в ячейку рекомбинирования. Ячейка снабжена обратным клапаном, который исключает преждевременное открытие контейнера и выход исследуемого вещества в атмосферу при случайном открытии вентилей (на входе в контейнер) или на выходе из него. Давление в ячейке рекомбинирования измеряется датчиками давления марки PIEZUS 3410 G.

На рис. 3 представлена система нагнетания флюида, предназначенная для насыщения углеводорода сверхкритическим CO<sub>2</sub> в ячейке рекомбинирования. Система состоит из баллона с CO<sub>2</sub> 1, вентилей запорных 2, 4, 8, 9, криотермостата 3, насоса высокого давления 6, массового расходомера 5, датчика давления 7, ячейки рекомбинирования 10. Все части системы соединены нержавеющей трубкой диаметром 3×1,0 мм из нержавеющей стали марки 12X18H10T.

Насос высокого давления обеспечивает изменение давления в диапазоне 1...40 МПа. С помощью расходомера Siemens измеряют массовый расход CO<sub>2</sub> с погрешностью не более 0,01 г/мин. Криотермостат позволяет закачивать CO<sub>2</sub> в ячейку рекомбинирования в жидком состоянии. Температура углекислого газа в криотермостате задается с неопределенностью не более ±0,1 °С.

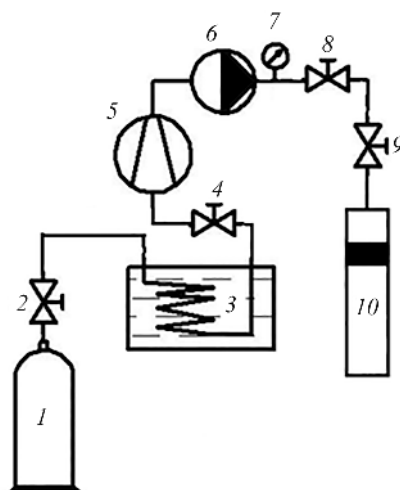


Рис. 3

После закачки необходимой порции диоксида углерода в ячейку рекомбинирования (см. рис. 1) вентиль 47 закрывается, газовый баллон отсоединяется от системы, вентили 45, 46, 37 открываются, и происходит поддавливание системы «углеводород – сверхкритический флюид» в ячейке рекомбинирования. В процессе поддавливания открываются вентили 41–43, и происходит заполнение «мертвого объема» соединительных труб. После наступления термодинамического равновесия в ячейке рекомбинирования открывают вентиль 51, соединяющий ячейку рекомбинирования с сосудом равновесия, и смесь начинает поступать в сосуд равновесия. По окончании этого процесса открывается вентиль 51, и происходит заполнение сосуда равновесия исследуемой смесью. Окончание заполнения определяют по датчику давления марки PIEZUS 3410 G, который измеряет давление внутри сосуда равновесия. После заполнения сосуда равновесия исследуемой жидкостью вентиль 51 закрывается, и с помощью измерительного пресса при открытом вентиле 53 давление в сосуде равновесия доводят до требуемого значения. Для этого плунжер измерительного пресса переводят в крайнее верхнее положение, открывают вентиль 10 и начинают доводить давление внутри сосуда равновесия до рабочего значения. По окончании предварительных операций осуществляется заполнение вискозиметра исследуемой смесью, для чего открываются вентили 51, 59, и смесь «углеводород – сверхкритический флюид» начинает переходить внутрь вискозиметра. После заполнения вискозиметра исследуемой смесью вентиль 59 закрывается, и происходит измерение времени качения шарика внутри тубуса вискозиметра.

Эксперимент начинается с установки вискозиметра под нужным углом к горизонтали, после чего включается электромагнит, и происходит отсчет времени движения шарика секундомером. Вискозиметр устанавливается на угол 15, 45, 60° к горизонтали.

Эксперимент проводится пять раз, после чего верхняя часть вискозиметра опускается, и цикл измерений времени движения шарика повторяется. В момент достижения противоположного конца трубки секундомер останавливается, и в журнал записывают значение времени  $\tau$ , в течение которого перекатывается шарик. Определение динамической вязкости углеводорода осуществляется по уравнению (1). Затем в зависимости от условий проведения эксперимента происходит повышение или понижение температуры и давления. С целью повышения температуры включается термостат, давление в системе поднимают с использованием измерительного пресса. После повышения температуры и давления происходит измерение времени прокатывания шарика.

По окончании измерения времени движения шарика цилиндрический корпус поворачивается на 180°, и снова измеряется время качения шарика в обратном направлении. Таким образом, увеличивая количество замеров в ходе одного эксперимента, можно осреднить все полученные показания. В момент прохождения шарика через датчик электронная система регистрирует изменение магнитного поля от постоянного магнита, что позволяет измерить время, прошедшее между двумя импульсами.

По окончании эксперимента составляется материальный баланс по сверхкритическому флюиду и углеводороду:

- по  $\text{CO}_2$

$$M_{\text{б.нач}} - M_{\text{б.конеч}} = M_{\text{яч}} + M_{\text{PVT}} + M_{\text{виск}}; \quad (2)$$

- по нефти

$$M_{\text{м.е}} = M_{\text{яч}} + M_{\text{виск}}. \quad (3)$$

Здесь:  $M_{\text{б.нач}} - M_{\text{б.конеч}}$  – изменение массы диоксида углерода в баллоне;  $M_{\text{яч}}$ ,  $M_{\text{PVT}}$ ,  $M_{\text{виск}}$  – масса  $\text{CO}_2$  в ячейке рекомбинирования, сосуде равновесия и вискозиметре;  $M_{\text{м.е}}$  – масса углеводорода в мерной емкости.

Поскольку смесь из ячейки рекомбинирования полностью поступает сначала в сосуд равновесия, затем в вискозиметр, то два слагаемых равны нулю, т. е. в вискозиметр попадает столько же углеводорода, сколько заливается в ячейку рекомбинирования.

На экспериментальной установке проведены пробные исследования динамической вязкости смеси турбинного масла с природным газом. Свойства исследуемых углеводородов приведены в таблице.

Вещество	Свойства при нормальных условиях	Наименование документа
Масло турбинное	$\rho_{\text{н.у}} = 905 \text{ кг/м}^3$ ; $\mu_{\text{н.у}} = 56,74 \text{ мПа}\cdot\text{с}$	ГОСТ 32-74
Газ природный	$\rho_{\text{н.у}} = 0,7 \text{ кг/м}^3$ ; $\mu_{\text{н.у}} = 0,01 \text{ мПа}\cdot\text{с}$	ГОСТ 31371.7-2008

Результаты пробных опытов приведены на рис. 4.

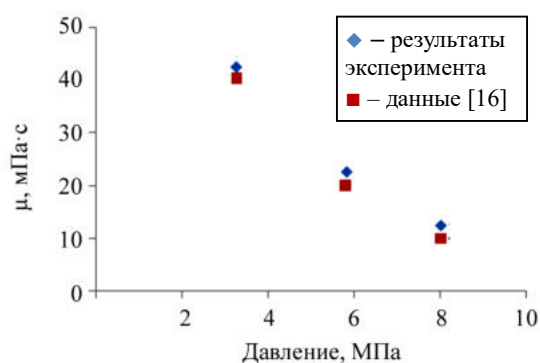


Рис. 4

Максимальное отклонение настоящих результатов от литературных данных не превышает 4,8 %, среднеквадратичное отклонение не более 3,8 %. Это позволяет сделать обоснованный вывод о надежности разработанной методики полученных результатов.

В работе выполнен расчет неопределенности измерения динамической вязкости углеводородов, насыщенных природным газом. Неопределенность измерения вязкости углеводорода, насыщенного сверхкритическим флюидом, определяется по уравнению в соответствии с ГОСТ 34100.3-2017:

$$\Delta\mu = \frac{\partial\mu}{\partial\tau} \frac{\Delta\tau}{\tau} + \frac{\partial\mu}{\partial\rho_{\text{ж}}} \frac{\Delta\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} + \frac{\partial\mu}{\partial\rho_{\text{ш}}} \frac{\Delta\rho_{\text{ш}}}{\rho_{\text{ш}}}. \quad (4)$$

При расчете учтем, что плотность шарика является постоянной величиной, поэтому третье слагаемое в уравнении (4) исключаем.

Для измерения плотности углеводородов использовали ареометр марки АНТ-2 (ГОСТ 18481-81), который позволяет измерять плотность с абсолютной погрешностью не более  $1 \text{ кг/м}^3$ . Относительная погрешность измерения плотности составляет

$$\frac{\partial\mu}{\partial\rho_{\text{ж}}} \rho_{\text{ж}} = \frac{\Delta\rho_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}}} = \frac{1}{777} 100 \% = 0,01 \%.$$

Расчет относительной погрешности измерения времени качения шарика осуществляется по уравнению

$$\frac{\partial \mu}{\partial \tau} \Delta \tau = \frac{\Delta \tau}{\tau} = \frac{0,02}{0,9} \cdot 100 \% = 2,2 \%$$

Таким образом, неопределенность измерения динамической вязкости углеводородов, насыщенных сверхкритическими флюидами, составляет не более 2,2 %, что позволяет использовать разработанную методику для измерения динамической вязкости широкого круга углеводородов, насыщенных сверхкритическими флюидами.

Таким образом, разработана методика измерения динамической вязкости углеводородов, насыщенных сверхкритическими флюидными системами, методом катящегося шарика при давлениях до 40 МПа, температурах до 373 К.

Проведены пробные измерения динамической вязкости системы «турбинное масло – природный газ» на изотерме 333 К при различных давлениях, проведен расчет неопределенности измерения, рассчитано среднеквадратичное отклонение результатов измерения от литературных данных.

Показана надежность экспериментальной установки и разработанной методики измерения динамической вязкости углеводородов, насыщенных сверхкритическими флюидами при температурах до 473 К, давлениях до 40 МПа.

Разработанная методика измерения динамической вязкости «углеводород – сверхкритический флюид» может быть применена для получения новых экспериментальных и расчетных данных при формировании технико-экономических рекомендаций при проектировании нефтяных месторождений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родченко С.А. Теплофизические исследования динамической вязкости н-алканов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ставрополь, 2002. 22 с.
2. Скородумов С.В. Экспериментальное исследование и составление таблиц вязкости аргона, неона и гелия при температурах 10–1300 К и давлении 0,1–100 МПа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1984. 18 с.
3. Хубатхузин А.А. Теоретические основы метода падающего груза и экспериментальное исследование плотности и вязкости углеводородов при температурах от 363 до 172 К и давлениях до 196 МПа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. 17 с.
4. Габитов И.Р., Саламатов Д.Ю., Накипов Р.Р. Коэффициент динамической вязкости олеиновой кислоты в диапазоне температур 313–473 К и давлении до 30 МПа // Вестник технологического университета. 2015. № 22. С. 10–12.
5. Мингулов И.Ш. Исследования вязкости пластовой жидкости на устье обводненных скважин нефтяных месторождений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2022. 23 с.
6. Шамсетдинов Ф.Р., Габитов И.Р., Зарипов З.И. Экспериментальная установка для исследования вязкости газонасыщенных жидких углеводородов при давлениях до 50 МПа // Вестник КНИТУ. 2013. № 18. С. 112–114.
7. Чупаев А.В. Модернизация капиллярного метода измерения вязкости // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2010. № 1-2. С. 137–140.
8. Маряшев А.В. Экспериментальное исследование вязкости аргона, воздуха, этилена и пропилена при давлениях до 200 МПа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 1978. 18 с.
9. Sato Y. et. al. A Digital Variable-Angle Rolling-Ball Viscometer for Measurement of Viscosity, Density, and Bubble-Point Pressure of CO<sub>2</sub> and Organic Liquid Mixtures // International Journal of Thermophysics. 2008. Vol. 31. P. 1896–1903.
10. Габитова А.Р. Динамическая и кинематическая вязкость рабочих сред в рамках процесса получения биодизельного топлива. 17 с.
11. Akhmadiyarov A.A. et al. Effect of Pressure, Temperature and Gas Phase Composition on the Rheological Properties of Heavy Crude Oil // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. № 282. Article № 012021.
12. Бочаров О.Б., Телегин И.Г. Влияние изменения вязкости нефти в процессе эксплуатации по решению модели Маскета – Леверетта // Изв. вузов. Нефть и газ. 2019. № 3. С. 39–46.
13. Ewen J.P. Probing the High-Pressure Viscosity of Hydrocarbon Mixtures Using Molecular Dynamics Simulations // Journal of Chemical Physics. 2020. Vol. 153. Iss. 15. Article № 154502.



14. *Таибулатов Р.Р.* Прогнозирование вязкостно-температурных характеристик течения смесей при совместной транспортировке различных нефтей в системе магистральных нефтепроводов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2019. 24 с.
15. *Шавалеев И.И. и др.* Изучение реологических свойств высоковязкой нефти Аканского месторождения предприятия Кара-Алтын // Нефтепромышленное дело. 2023. № 7 (665). С. 30–33.
16. *Шагиахметов Р.А.* Исследование вязкости, плотности масел и влияния растворенного газа на величину вязкости при давлениях до 100–200 МПа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Казань, 1981. 22 с.

Поступила в редколлегию 13.05.25

## MEASUREMENT OF THE DYNAMIC VISCOSITY OF HYDROCARBONS SATURATED WITH SUPERCRITICAL CO<sub>2</sub> BY ROLLING BALL METHOD

**I.D. Zakiev, A.V. Radaev, A.N. Sabirzyanov, I.T. Salimyanov,  
and I.I. Shavaleev**

The research is aimed at developing a methodology for measuring the dynamic viscosity of hydrocarbon-supercritical fluid systems in a wide range of pressures and temperatures. The article provides an overview of the existing methods for measuring the dynamic viscosity of hydrocarbons and their mixtures at various pressures and temperatures. The relevance of measuring the dynamic viscosity of hydrocarbon-supercritical fluid systems at high pressures and temperatures is shown. An equation is proposed for calculating the dynamic viscosity of turbine oil saturated with natural gas based on experimental data on the density of the liquid and the rolling time of the ball. The purpose of the study is to test the developed method, obtain experimental results and compare them with the literature. The rolling ball method was used to measure the dynamic viscosity of hydrocarbons saturated with supercritical fluid. results. Trial experiments were carried out on the experimental installation to measure the dynamic viscosity of a mixture of turbine oil with natural gas in the pressure range up to 40 MPa at an isotherm of 333 K. The paper presents a material balance for supercritical fluid and hydrocarbon, which allows us to calculate the mass fraction of natural gas in turbine oil. The uncertainty and the standard deviation of the obtained results from the literature are calculated.

**Keywords:** supercritical fluid, viscometer, dynamic viscosity, rolling ball method.

---

**Закиев Ирек Дагсимович** – ассистент (КНИТУ, Казань)

E-mail: trapgo@gmail.com

**Радаев Андрей Викторович** – канд. техн. наук (АГТУ ВШН, Альметьевск)

E-mail: radaev\_neftianik@mail.ru

**Сабирзянов Айдар Назимович** – д-р техн. наук (КНИТУ, Казань)

E-mail: sabirs@kstu.ru

**Салимьянов Инис Тахирович** – канд. техн. наук (КНИТУ, Казань)

E-mail: inisal@yandex.ru

**Шавалеев Ирек Илькамович** – канд. техн. наук (ООО РНЦ «Урал-Поволжье», Бугульма)

E-mail: irek.shavaleev@mail.ru

## ТЕПЛООБМЕН ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ МИКРОСТРУКТУРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОЛУЗАКРЫТЫМИ КАНАЛАМИ

И.А. Попов, С.И. Каськов, А.В. Щелчков, Ю.С. Степанова,  
Р.А. Аксянов

Представлены результаты исследования теплообмена с микроструктурированными поверхностями с двухмерным рельефом в виде полузакрытых каналов, полученными методом деформирующего резания, при кипении дистиллированной воды в условиях свободной конвекции. На основе графического анализа результатов экспериментальных исследований выявлено влияние режимных и конструктивных параметров на коэффициент теплоотдачи и критические тепловые потоки. Получены критериальные уравнения для оценки коэффициента теплоотдачи и критических тепловых потоков в рассмотренных условиях кипения.

**Ключевые слова:** кипение, теплоотдача, критический тепловой поток, интенсификация, микроструктурированная поверхность.

В связи с ростом единичной мощности микропроцессорной техники и силовой электроники необходимы компактные высокоэффективные системы охлаждения. Данные проблемы решаются с использованием жидкостных систем охлаждения с фазовыми переходами, включая паровые камеры, термосифоны и тепловые трубы, иммерсионные системы охлаждения. В них реализуется режим кипения рабочих жидкостей для повышения уровня отводимых тепловых нагрузок, в том числе кипение на интенсифицированных поверхностях с микрорельефами.

Методы и способы интенсификации теплообмена при кипении традиционны [1–3]: увеличение плотности центров парообразования, управление смачиваемостью поверхностей, повышение притока жидкости в зону испарения микрослоя, увеличение теплообменной поверхности. Задачи решаются созданием микроструктур на поверхности теплообмена. В настоящее время для создания микроструктурированных поверхностей кипения используется широкий спектр методов – механическая обработка, химическое травление, фотолитография, анодирование, химическая полировка, окисление, осаждение нано- и микрочастиц, напыление частиц и спекание пористого покрытия, нанесение сетчатого покрытия и т. д. Наибольший интерес представляет технология деформирующего резания. Принцип данного метода основан на частичном срезе слоя поверхности с дальнейшей деформацией подрезанного слоя без его отделения от основной массы заготовки. Метод безотходен, имеет широкий диапазон регулируемых геометрических параметров. Площадь поверхности изделий, полученных методом деформирующего резания, увеличивается в 12 раз по сравнению с исходной заготовкой. Метод может быть реализован на стандартном металлорежущем оборудовании. Совокупность получаемых элементов обеспечивает формирование упорядоченных микроструктурированных поверхностей кипения с двумерными (рис. 1, а), трехмерными (рис. 1, б) рельефами и рельефами в виде полузакрутых каналов (рис. 1, в).

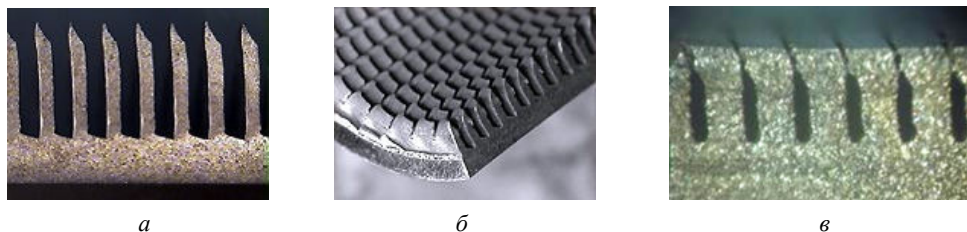


Рис. 1

Цель работы – анализ и обобщение экспериментальных данных по коэффициенту теплоотдачи и критическим тепловым потокам при кипении различных жидкостей в условиях свободной конвекции на микроструктурированных поверхностях с рельефами в виде полузакрутых каналов (см. рис. 1, в).

Получены и исследованы микроструктурированные поверхности с элементами шероховатости, сопоставимыми с постоянной Лапласа или капиллярной постоянной  $l_0 = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}} (где \sigma – коэффициент поверхностного натяжения; g – ускорение свободного падения; \rho', \rho'' – плотности жидкости и ее пара), которая характеризует наличие капиллярного эффекта под паровыми пузырьками в каналах между элементами рельефа. Благодаря капиллярному эффекту в элементах шероховатости обеспечивается снабжение жидкостью области испарения, включая мениски и области сухих пятен под паровыми пузырьками, что приводит к увеличению критических тепловых потоков и коэффициента теплоотдачи. Применение капиллярной постоянной в качестве масштаба нормирования позволяет подразделять микроканальные структуры на капилляры и собственно сосуды.$

Структура исследованных образцов поверхностей кипения с рельефами в виде полужакрытых каналов приведена на рис. 2, а. Внешний вид поперечных шлифов исследованных поверхностей кипения № 24 показан на рис. 2, б, № 20 – на рис. 2, в.

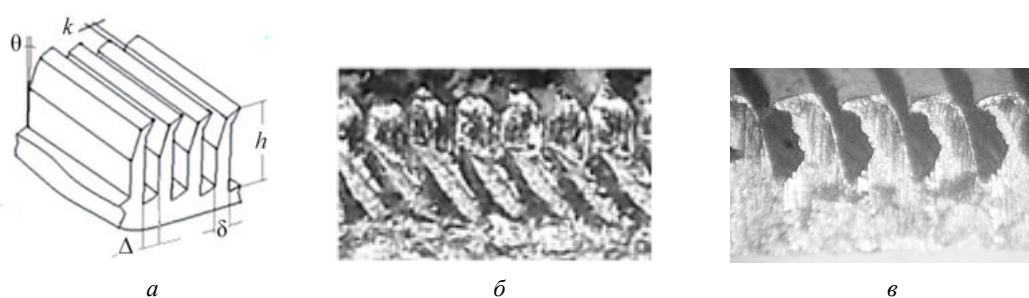


Рис. 2

В таблице приведены геометрические параметры микроструктурированных поверхностей с рельефами в виде полужакрытых каналов – высота элементов рельефа  $h$ , зазор между элементами рельефа в их основании  $\Delta$ , толщина элементов  $\delta$ , зазор между элементами рельефа на выходе из канала  $k$ , угол наклона элементов  $\theta$ . Режимные параметры – бидистиллированная вода,  $P = 105$  Па,  $T = 373$  К.

Материал поверхности	Геометрические параметры				
	$h$ , мкм	$\Delta$ , мкм	$\delta$ , мкм	$k$ , мкм	$\theta$ , град
Сталь 316L	300	44	26	10	85
BT1-00	360	85	115	15	65
BT1-00	200	35	65	10	83
Сталь 316L	300	5	95	5	90
Сталь 316L	350	5	75	5	90
BT1-00	200	40	160	10	60

Экспериментальные исследования теплообмена при кипении на рассматриваемых поверхностях проведены на установке и по методике [3–6].

При анализе экспериментальных данных по коэффициенту теплоотдачи использовались результаты экспериментальных исследований, полученные в данной работе на поверхностях кипения, геометрические параметры которых приведены в таблице.

На рис. 3 показана зависимость коэффициента теплоотдачи при кипении дистиллированной воды от плотности теплового потока  $q$  в диапазоне  $(0,6 \div 200)10^4$  Вт/м<sup>2</sup>.

Для сравнения приведены данные на гладкой поверхности. Полученные данные позволяют определить влияние на коэффициент теплоотдачи геометрических параметров шероховатости горизонтальных микроструктурированных поверхностей. В случае поверхностей № 3, 6 с минимальной высотой рельефа выявлен наибольший прирост коэффициента теплоотдачи до наступления кризиса кипения по

сравнению с гладкой поверхностью. При анализе среднего значения коэффициента теплоотдачи во всем диапазоне изменяемых плотностей теплового потока наблюдается наибольшее отклонение по сравнению с гладкой пластиной – приблизительно в три раза.

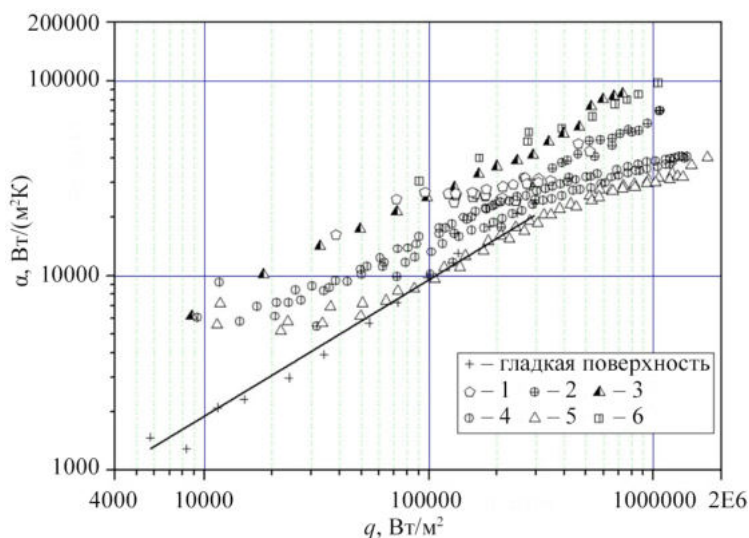


Рис. 3

Для разработки рекомендаций по использованию полученных результатов в инженерных приложениях проведено обобщение экспериментальных данных с использованием графического метода на основе метода наименьших квадратов по модели

$$\alpha/\alpha_0 = f_1(K_q, h/l_0, k/l_0, \delta/l_0, \Delta/l_0, \theta/90),$$

где  $\alpha$ ,  $\alpha_0$  – коэффициенты теплоотдачи при кипении воды на микроструктурированной и гладкой поверхностях. В качестве значений  $\alpha_0$  могут использоваться результаты экспериментального исследования или значения, рассчитанные по формуле для кипения воды в большом объеме [7]. В качестве нормирующей функции для геометрических параметров использовалась постоянная Лапласа  $l_0$ .

Оценка влияния масштаба осредненной скорости движения жидкости  $K_q = ql_0/(r\rho''v')$ , обусловленного процессом парообразования, на коэффициент теплоотдачи показала, что  $K_q$  влияет на повышение коэффициента теплоотдачи в степени  $-0,214$ . Установлено, что  $h/l_0$  влияет на повышение коэффициента теплоотдачи с учетом ранее выявленного влияния параметра  $K_q$  в степени  $-1,1$ . Выявлено, что относительный зазор  $\Delta/l_0$  влияет на повышение коэффициента теплоотдачи с учетом ранее выявленных влияний параметра  $K_q$  и относительной высоты ребра  $h/l_0$  в степени  $0,13$ . Ширина зазора в устье между ребрами  $k/l_0$ , угол наклона рельефа  $\theta/90$  и относительной толщины ребер  $\delta/l_0$  практически влияют на уже полученный комплекс:

$$(\alpha/\alpha_0) / \left( K_q^{-0,21} (h/l_0)^{-1,1} (\Delta/l_0)^{0,13} \right).$$

В ходе обобщения более 250 экспериментальных точек получена зависимость для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении воды в большом объеме на поверхностях кипения с рельефами в виде открытых каналов:

$$(\alpha/\alpha_0) = 2,1 K_q^{-0,21} (h/l_0)^{-1,1} (\Delta/l_0)^{0,131}. \quad (1)$$

Зависимость (1) справедлива в диапазоне  $K_q = 80 \div 2000$ ;  $\theta/90 = 0,72 \div 1$ ;  $h/l_0 = 0,06 \div 0,1$ ;  $\delta/l_0 = 0,007 \div 0,046$ ;  $k/l_0 = 0,0014 \div 0,043$ ;  $\Delta/l_0 = 0,0014 \div 0,024$ ;  $Pr = 1,75 \div 2,35$ .

На рис. 4 показано, что зависимость (1) удовлетворительно описывает экспериментальные точки с отклонением  $\pm 30\%$  при доверительной вероятности 0,95.

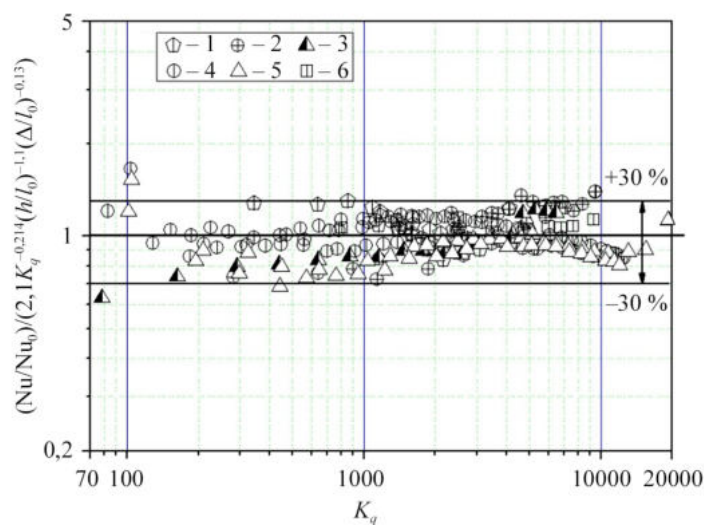


Рис. 4

Согласно анализу зависимости (1) в исследуемом диапазоне значений  $\Delta/l_0$  с увеличением относительного зазора между элементами рельефа  $\Delta/l_0$  коэффициент теплоотдачи на микроструктурированных поверхностях увеличивается. Это совпадает и с ранее полученными результатами для поверхностей кипения с двух- и трехмерными микрорельефами. Как показывает анализ моделей кипения на микроструктурированных поверхностях, отвод теплоты производится при кипении жидкости как на верхних площадках элементов рельефа микроструктур, так и на боковых. Увеличение  $\Delta/l_0$  позволяет улучшить отвод пара из зазоров и обеспечить повышение коэффициента теплоотдачи. Увеличение относительной высоты элементов рельефа  $h/l_0$  уменьшает интенсивность отвода теплоты. Это отличается от выявленного влияния на двух- и трехмерных поверхностях. Здесь увеличение высоты ухудшает отвод теплоты из полужамкнутого объема между ребрами.

Следует отметить, что вследствие стохастического характера процесса кипения предложенная зависимость (1) имеет рекомендательный характер. Она позволяет произвести оценку влияния геометрических параметров для обоснования выбора геометрических параметров при проектировании и создании новых образцов теплообменного оборудования и систем охлаждения.

На рис. 5 показана кривая кипения воды в условиях свободной конвекции для микроструктурированных поверхностей кипения с рельефами в виде открытых каналов. Стрелками обозначены величины критического теплового потока.

В случае поверхностей № 1–3 с микрошероховатостью в виде открытых каналов критические тепловые потоки увеличиваются в 2,3–3 раза. Установлено, что кризис кипения на поверхности № 2 наступает при более высоких перегревах стенки.

Обобщение данных по критическим тепловым потокам производилось по модели

$$q_{\text{крит}}/q_{\text{крит}0} = f_2((\theta/90), (h/l_0), (\Delta/l_0), (\delta/l_0), (k/l_0), \text{Pr}),$$

где  $q_{\text{крит}}$ ,  $q_{\text{крит}0}$  – критические тепловые потоки при кипении жидкости на микроструктурированной и гладкой поверхностях. В качестве критических тепловых потоков при кипении жидкости на гладкой поверхности  $q_{\text{крит}0}$  можно принять значения, полученные экспериментально или с использованием зависимости для критических тепловых потоков [8] с рекомендациями о внесении поправок на толщину тонкостенных поверхностей кипения [9].



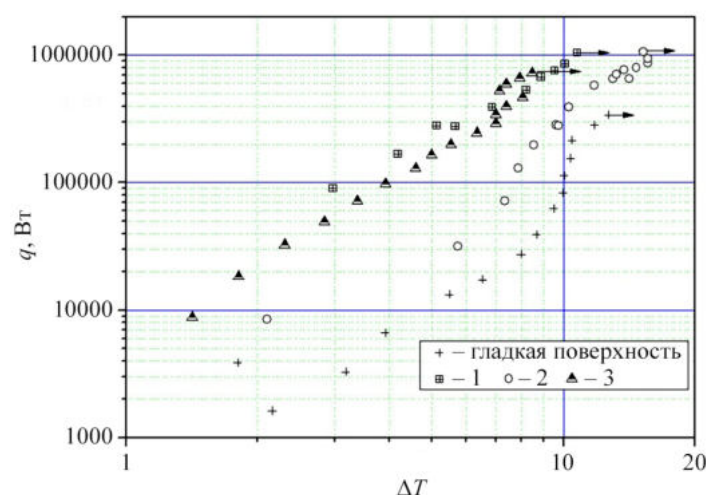


Рис. 5

Новым результатом является определение зависимости для оценки критических тепловых потоков при кипении воды на поверхностях с рельефом в виде микрорельефов. Ограниченность экспериментальных точек не позволяет говорить о полной достоверности полученных результатов. Обобщение с использованием регрессионного анализа позволило получить зависимость в виде

$$q_{\text{крит}}/q_{\text{крит}0} = 19,8 (\theta/90)^{-0,2} (h/l_0)^{0,35} (\Delta/l_0)^{0,15} (\delta/l_0)^{-0,245} (k/l_0)^{0,35} \text{Pr}^{-2/3}. \quad (2)$$

Зависимость (2) описывает экспериментальные точки с отклонением  $\pm 1,0$  % при доверительной вероятности 0,95.

Таким образом, получены обобщающие зависимости для оценки коэффициента теплоотдачи и критических тепловых потоков при кипении воды в условиях свободной конвекции на микроструктурированных поверхностях в виде открытых каналов. Данные зависимости являются рекомендациями для предварительной оценки параметров при разработке систем охлаждения высокотеплонагруженных элементов.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках соглашения о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг, шифр FZSU-2023-0004.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дедов А.В. Обзор современных методов интенсификации теплообмена при пузырьковом кипении // Теплоэнергетика. 2019. № 12. С. 18–54.
2. Павленко А.Н., Жуков В.И., Швецов Д.А. Кризисные явления и интенсификация теплообмена при кипении и испарении в горизонтальных пленках жидкости (обзор) // Теплоэнергетика. 2022. № 11. С. 81–97.
3. Popov I.A. et al. Heat Transfer Enhancement and Critical Heat Fluxes in Boiling of Microfinned Surfaces // High Temperature. 2017. Vol. 55. № 4. P. 524–534.
4. Попов И.А. и др. Интенсификация теплоотдачи и критические тепловые потоки при кипении на поверхностях с микроорегблением // Теплофизика высоких температур. 2017. № 4. С. 537–548.
5. Попов И.А., Щелчков А.В. Кипение различных жидкостей на микроструктурированных поверхностях // Инженерно-физический журнал. 2014. № 6. С. 1362–1374.
6. Коханова Ю.С. и др. Определение зависимости коэффициента теплоотдачи и критических тепловых потоков от геометрических параметров трехмерных микроструктурированных поверхностей, полученных методом деформирующего резания, при кипении различных жидкостей // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2020. № 4. С. 12–17.
7. Боришанский В.М. Теплообмен при пузырьковом кипении // Тепло- и массоперенос. 1973. Т. 10. Ч. 1. С. 313–329.
8. Кутателадзе С.С. Теплопередача при конденсации и кипении. М. – Л.: Мешгиз, 1952. 232 с.
9. Гогонин И.И. Теплообмен при пузырьковом течении. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. 227 с.

Поступила в редколлегию 11.06.25

# **POOL BOILING HEAT TRANSFER OF WATER ON A HORIZONTAL MICROSTRUCTURED SURFACE WITH SEMI-CLOSED CHANNELS**

**I.A. Popov, S.I. Kas'kov, A.V. Shchelchkov,  
Yu.S. Stepanova, and R.A. Aksyanov**

The results of a study of heat transfer on surfaces with microstructured surfaces with two-dimensional relief in the form of semi-closed channels obtained by deforming cutting during boiling of distilled water under conditions of free convection are presented. Based on a graphical analysis of the experimental research results, the influence of operating and design parameters on heat transfer coefficients and critical heat flows has been revealed. Criterion equations for estimating heat transfer coefficients and critical heat fluxes under the considered boiling conditions are obtained.

**Keywords:** boiling, heat transfer, critical heat flow, enhancement, microstructured surface.

---

**Попов Игорь Александрович** – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)  
E-mail: popov-igor-alex@yandex.ru

**Каськов Сергей Иосифович** – ст. преподаватель (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)  
E-mail: kaskov\_si@mail.ru

**Щелчков Алексей Валентинович** – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)  
E-mail: avschelchkov@kai.ru

**Степанова Юлия Семеновна** – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)  
E-mail: yulkoh@yandex.ru

**Аксянов Рустем Айдарович** – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)  
E-mail: raaksyanov@kai.ru

## ПОДОБИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРАЦИИ СИСТЕМ «УГЛЕВОДОРОД – СВЕРХКРИТИЧЕСКИЙ ФЛЮИД» В ОДНОРОДНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

А.В. Радаев, А.Н. Сабирзянов, Н.А. Васенева

Разработана математическая модель процесса одномерной нестационарной фильтрации системы «углеводород – сверхкритический флюид» в однородной пористой среде в однофазной и двухфазной постановке. Методом масштабных преобразований дифференциальных уравнений математической модели получены симплексы подобия и разработано критериальное уравнение, позволяющее обобщить 95 % экспериментальных результатов со среднеквадратичным отклонением не более 13,8 %. Выполнен анализ влияния разработанных симплексов подобия на остаточную насыщенность пористой среды углеводородом в процессе нестационарной фильтрации системы «углеводород – сверхкритический флюид» в однородной пористой среде.

**Ключевые слова:** фильтрация, масштабное преобразование, дифференциальные уравнения, теория подобия.

Одним из подходов к представлению результатов в безразмерной форме является их выражение в виде обобщающей зависимости искомого параметра от симплексов подобия, построенных с использованием метода анализа размерностей, получаемых методом анализа размерностей, как, например, в работах [1, 2]. В рамках данной методики безразмерные параметры выбираются на основе их значимости для описания процесса фильтрации. Так, при моделировании фильтрационных процессов в пористой среде наиболее значимыми параметрами оказываются плотность, температура, вязкость флюида и углеводорода, а также ряд других факторов. Однако основным недостатком такого подхода является вероятность того, что какие-то значимые характеристики процесса не будут учтены.

Другим подходом к получению безразмерных комплексов подобия является метод масштабных преобразований дифференциальных уравнений, описывающих процесс. Основная идея такого подхода состоит в том, что из обширного класса однородных с физической точки зрения процессов фильтрации, описываемых одной и той же системой дифференциальных уравнений, выбирают более узкую группу таких процессов, в пределах которой возможно распространение результатов единичных экспериментов. В этом случае для получения безразмерных симплексов подобия из размерных параметров, входящих в дифференциальные уравнения, необходимо выбрать те из них, которые имеют независимую размерность, а оставшиеся выразить через параметры с независимой размерностью, после чего с использованием  $\pi$ -теоремы составить безразмерные комплексы и обобщающую зависимость одних безразмерных комплексов или симплексов подобия от других. Такой подход описан в работе [3]. В настоящей работе метод масштабных преобразований предлагается использовать для описания процесса нестационарной фильтрации системы «углеводород – сверхкритический флюид» в пористой среде различной проницаемости.

Разработанная математическая модель описывает процесс нестационарной фильтрации одно- и двухфазного потока «углеводород – сверхкритический флюид». Обозначения, применяемые при разработке настоящей математической модели, приведены на рис. 1.

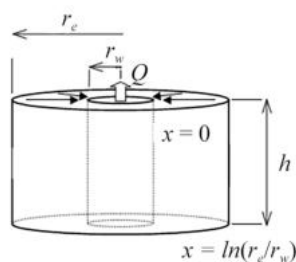


Рис. 1



В общем виде математическая модель описывает процесс одно- и двухфазной нестационарной фильтрации системы «жидкость – сверхкритический флюид» в пористой среде.

Математическая модель разработана с учетом следующих допущений: процесс изотермический, движение флюида безынерционное, подчиняется закону Дарси, температура потока и пористой среды в каждом элементарном объеме совпадают, деформация скелета пористой среды отсутствует, среда характеризуется усредненными теплофизическими и физико-химическими свойствами, массообмен между твердой поверхностью породы и компонентами жидкости отсутствует.

В настоящей работе рассматривается процесс нестационарной двухкомпонентной одно- и двухфазной фильтрации системы «углеводород» и «углеводород – сверхкритический флюид».

Уравнение неразрывности для фазы «углеводород»:

$$\frac{1}{r^2} e^{-2x} \frac{\partial}{\partial x} \left( \bar{k} \frac{k_{r0}}{B_0} \frac{\partial P}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{m S_0}{B_0} \right), \quad (1)$$

уравнение неразрывности для фазы «углеводород – сверхкритический флюид»:

$$\frac{1}{r^2} e^{-2x} \frac{\partial}{\partial x} \left[ k \left( \frac{k_{rg}}{B_g \mu_g} \frac{\partial \bar{P}_g}{\partial x} + \frac{R_{s0} k_{r0}}{B_0} \frac{\partial \bar{P}_0}{\partial x} \right) \right] = \frac{\partial}{\partial t} \left[ m \left( \frac{1 - S_0}{B_g} + \frac{R_{s0} S_0}{B_0} \right) \right]. \quad (2)$$

Здесь:  $m$  – пористость модели пласта;  $B_0, B_g$  – объемный коэффициент углеводорода, насыщенного сверхкритическим флюидом, и объемный коэффициент  $\text{CO}_2$ ;  $k, k_{r0}, k_{rg}$  – коэффициенты абсолютной проницаемости пористой среды и относительной фазовой проницаемости углеводорода, насыщенного сверхкритическим флюидом, и сверхкритического флюида;  $R_{s0}$  – растворимость  $\text{CO}_2$  в углеводороде;  $P_0, P_g$  – давление в углеводороде и сверхкритическом флюиде;  $\mu_g$  – динамическая вязкость углеводорода, насыщенного сверхкритическим флюидом, и сверхкритического флюида;  $t$  – время проведения численного эксперимента;  $S_0, S_g$  – насыщенность пористой среды углеводородом и сверхкритическим флюидом. Для замыкания модели используются начальные и граничные условия. Начальные условия задаются значениями давления и насыщенности углеводородом пористой среды в начальный момент времени. В настоящей работе параметры с индексом «0» относятся к углеводороду, насыщенному сверхкритическим флюидом.

Начальные условия определяются следующими выражениями для всех  $r$ :

$$P_0(r, t) = P_{00}; \quad (3)$$

$$S(r, t = 0) = S_0, \quad (4)$$

где  $P_{00}, S_0$  – давление и насыщенность пористой среды углеводородом на входе в экспериментальную ячейку в начальный момент времени.

Относительные проницаемости по углеводороду и углеводороду, насыщенному сверхкритическим  $\text{CO}_2$ , определяются по уравнениям

$$k_{r0} = k_{r0}^* \left( \frac{S_0 - S_{0r}}{1 - S_{0r} - S_{gc}} \right)^{n_0}; \quad (5)$$

$$k_{rg} = k_{rg}^* \left( \frac{1 - S_0 - S_{gc}}{1 - S_{0r} - S_{gc}} \right)^{n_0}, \quad (6)$$

где  $S_{0r}$  – остаточная насыщенность пористой среды углеводородом, доли;  $S_0$  – начальная насыщенность пористой среды углеводородом, доли;  $S_{gc}$  – критическое значение насыщенности пористой среды углеводородом, доли.

Критическое значение насыщенности пористой среды газом принято равным 0,3 согласно работе [4].  
Граничные условия второго рода (фильтрация при заданном расходе):

$$Q_j = 2\pi h k \frac{k_{rj}}{\mu_j} \frac{\partial P_j}{\partial x} \Big|_{x=\ln\left(\frac{r}{r_w}\right)} . \quad (7)$$

Замыкающие соотношения приняты по насыщенностям пористой среды углеводородом и сверхкритическим флюидом:

$$S_0 = 1 - S_g . \quad (8)$$

Другим замыкающим соотношением является уравнение, определяющее связь между давлениями в фазах, т. е. капиллярное давление:

$$P_0 - P_g = P_k(\sigma) , \quad (9)$$

где  $P_0$ ,  $P_g$  – давление в углеводороде и сверхкритическом флюиде;  $\sigma$  – значение межфазного натяжения на границе «углеводород – сверхкритический флюид».

Уравнения (1), (2) с начальными условиями (3), (4) и граничными условиями по углеводороду и сверхкритическому флюиду (5) с замыкающими соотношениями (6), (7) аппроксимируются по неявной схеме (неявно по давлению, явно по насыщенности) методом IMPES. Схема дискретизации и методика решения дифференциальных уравнений описана в работах [5, 6]. Процесс аппроксимации уравнений (1), (2) осуществляется переходом от непрерывных аргументов к дискретным, а именно, на каждый момент времени рассчитывается давление из системы линейных уравнений, при этом насыщенность берется из предыдущего временного слоя. Затем насыщенность пересчитывается явно с использованием найденных значений давления.

Рассмотрим метод масштабных преобразований дифференциальных уравнений.

В уравнения входят пятнадцать параметров:  $r_w$ ,  $r_e$ ,  $k$ ,  $k_{r0}$ ,  $k_{rg}$ ,  $B_g$ ,  $B_0$ ,  $R_{s0}$ ,  $\mu_0$ ,  $\mu_g$ ,  $P_0$ ,  $P_g$ ,  $h$ ,  $\phi$ ,  $S_0$ , из которых  $S_0$ ,  $P_g$ ,  $P_0$  являются определяемыми функциями. Кроме того, уравнения (1), (2) содержат два аргумента функции – координату  $x$  и время  $t$ , которые являются размерными величинами, но в число параметров уравнения не входят.

Параметр  $S_{п}$  не будем учитывать, так как  $S_g = 1 - S_0$  либо  $S_0 = 1 - S_g$ . Кроме того, из рис. 1 видно, что  $x$  – безразмерная координата, вдоль которой происходит процесс фильтрации, т. е. в безразмерном виде координата  $x$  выглядит, как  $\bar{x}$ .

В качестве параметров, имеющих независимые размерности, приняты следующие:  $r_0$ , м;  $\mu_0$ , Па·с;  $P_{00}$  (давление в начальный момент времени), Па. Таким образом, с помощью параметров с независимыми размерностями необходимо выразить оставшиеся размерные параметры, которые не являются аргументами или функциями в уравнениях (1), (2), а именно  $h$ ,  $r_w$ ,  $k$ ,  $\mu_g$ ,  $P_g$ .

Тогда получим:

$$\bar{r}_w = \frac{r_w}{r_e} ; \quad (10)$$

$$\bar{\mu}_g = \frac{\mu_g}{\mu_0} ; \quad (11)$$

$$\bar{k} = \frac{k}{r_e^2} ; \quad (12)$$

$$\bar{h} = \frac{r_w}{r_e} ; \quad (13)$$

$$\bar{P}_0 = \frac{P_0}{P_{00}} ; \quad (14)$$

$$\bar{P}_g = \frac{P_g}{P_{00}}; \quad (15)$$

$$\tau = \frac{tP_{00}}{\mu_0}, \quad (16)$$

$S_0$  и  $x$  размерности не имеют.

Из начальных условий получаются следующие безразмерные параметры:

$$\frac{P}{P_{00}} = 1; \quad (17)$$

$$S_{\text{вх}} = S_{00}, \quad (18)$$

где  $S_{00}$  – насыщенность пористой среды углеводородом в начальный момент времени.

Граничные условия не дают дополнительных симплексов подобия, так как

$$\bar{Q} \left[ \frac{P_{00} r_e^3}{\mu_0} \right] = 2\pi \bar{h} \bar{k} r_0 \frac{k_{r0}}{\mu_0} \frac{P_{00}}{r_0}; \quad (19)$$

$$\bar{Q} = 2\pi \bar{k} \bar{h} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x}. \quad (20)$$

Аналогично методом масштабных преобразований преобразуем граничное условие по расходу  $\text{CO}_2$ . Граничное условие по расходу  $\text{CO}_2$  также не дает дополнительных симплексов подобия.

Таким образом, получаются пять безразмерных параметров из восьми размерных величин, два безразмерных аргумента  $\bar{x}$ ,  $\tau$ , две безразмерные функции  $S_0(\bar{x}, \tau)$ ,  $\bar{P}(\bar{x}, \tau)$ . Кроме того, учитывая, что  $h$  по рис. 1 – это толщина пласта и в настоящей работе рассматривается одномерная задача, т. е. принимается, что процесс фильтрации осуществляется по одной координате, можно принять, что толщина пласта на конечное значение остаточной насыщенности пористой среды не влияет, поэтому размерность  $h$  в первом приближении можно принять равной единице, т. е. безразмерной.

После проведения масштабных преобразований дифференциальных уравнений получим следующую систему дифференциальных уравнений в безразмерном виде:

$$\frac{1}{\bar{r}_2} e^{-2\bar{x}} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left( \bar{k} \frac{k_{r0}}{B_0} \frac{\partial \bar{P}_0}{\partial \bar{x}} \right) = \frac{\partial}{\partial \tau} \left( \frac{m S_0}{B_0} \right); \quad (21)$$

$$\frac{1}{\bar{r}^2} e^{-2\bar{x}} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left[ k \left( \frac{k_{rg}}{B_g \bar{\mu}_g} \frac{\partial \bar{P}_g}{\partial \bar{x}} + \frac{R_{s0} k_{r0}}{B_0} \frac{\partial \bar{P}_0}{\partial \bar{x}} \right) \right] = \frac{\partial}{\partial \tau} \left[ m \left( \frac{1 - S_0}{B_g} + \frac{R_{s0} S_0}{B_0} \right) \right]. \quad (22)$$

Таким образом, получается семь безразмерных симплексов подобия:

$$\pi_1 = \frac{1}{r_w^2}; \quad (23)$$

$$\pi_2 = \frac{k_{r0} \bar{k}}{B_0}; \quad (24)$$

$$\pi_3 = \frac{m}{B_0}; \quad (25)$$

$$\pi_4 = \frac{k_{rg} \bar{k}}{B_g \bar{\mu}_g}; \quad (26)$$

$$\pi_5 = \frac{R_{s0} k_{r0} \bar{k}}{B_0}; \quad (27)$$

$$\pi_6 = \frac{mR_{s0}}{B_0}; \quad (28)$$

$$\pi_7 = \frac{m}{B_g}. \quad (29)$$

Учитывая, что симплексы подобия получены методом масштабных преобразований дифференциальных уравнений, для полного подобия исследуемого процесса натурному необходимо равенство безразмерных параметров (10) – (16) и безразмерных симплексов (23) – (29), а также равенство безразмерных начальных условий (17), (18) и граничных условий по сверхкритическому флюиду и углеводороду (20).

Условие (10) и симплекс подобия (23) на промыслах могут быть обеспечены самой геометрией пласта. Кроме того, как это следует из рис. 1, отношение  $r_w/r_e$  либо  $r_e/r_w$  не будет влиять на конечное значение насыщенности пористой среды углеводородом, так как в лабораторных условиях эксперимент ограничен областью  $r_e \dots r_w$ , т. е. описывается процесс фильтрации по нефтяному пласту, а не внутри скважины. В связи с этим симплекс  $\pi_1$  исключен из рассмотрения.

Получаем следующее обобщающее уравнение в безразмерном виде:

$$S_0 = 0,6235\pi_2^{0,066}\pi_3^{-0,333}\pi_4^{0,0683}\pi_5^{0,062}\pi_6^{-0,212}\pi_7^{0,2322}. \quad (30)$$

На рис. 2 обобщены экспериментальные данные по фильтрации систем «керосин – сверхкритический  $\text{CO}_2$ » и «трансформаторное масло – сверхкритический  $\text{CO}_2$ » с использованием симплексов подобия.

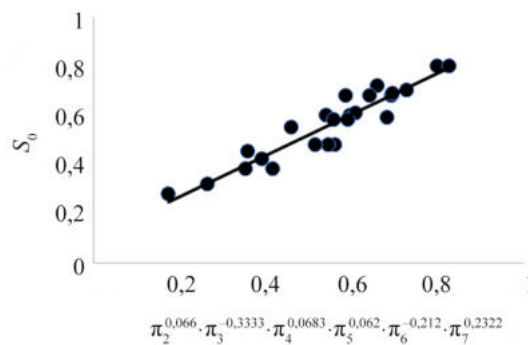


Рис. 2

Согласно расчетам 95 % экспериментальных результатов описываются единым уравнением со среднеквадратичным отклонением 13,8 %, что соответствует среднеквадратичному отклонению экспериментальных данных от расчетных по разработанной математической модели (12,8 %). Все экспериментальные точки (эксперименты по фильтрации керосина вязкостью 1,2 мПа·с в пористой среде проницаемостью 0,18 и 0,038 мкм<sup>2</sup> на изотермах 313, 333, 353 К, по фильтрации трансформаторного масла вязкостью 23,31 мПа·с в пористой среде проницаемостью 0,038 мкм<sup>2</sup> на изотермах 313 и 333 К при давлениях до 12 МПа) могут быть обозначены одной обобщающей прямой. Причиной этого является тот факт, что безразмерные симплексы получены методом масштабных преобразований дифференциальных уравнений, которые, в свою очередь, решены численно во всем исследованном экспериментально интервале по вязкости углеводородов, проницаемости пористой среды, давлениям и температурам.

Из семи полученных симплексов подобия симплексы  $\pi_3$ ,  $\pi_6$ ,  $\pi_7$  характеризуют отношение фильтрационно-емкостных свойств пористой среды к теплофизическим свойствам углеводорода и сверхкритического флюида. Симплексы  $\pi_2$ ,  $\pi_4$ ,  $\pi_5$ , как это можно определить из (1), (2), являются безразмерными уравнениями движения, так как  $v_i = -\frac{k_i}{\mu_i} \frac{\partial P}{\partial x}$ . Наибольшее влияние на остаточную насыщенность пористой

среды углеводородом, вероятнее всего, оказывает симплекс  $\pi_4$ , так как он характеризует не только скорость фильтрации, но и включает отношение вязкостей  $\bar{\mu}$  углеводорода, насыщенного сверхкритическим флюидом, и самого сверхкритического флюида. Значение этого соотношения зависит от фазового поведения углеводорода и сверхкритического флюида: с увеличением давления в углеводороде будет растворяться большее количество сверхкритического флюида, динамическая вязкость углеводорода с растворенным сверхкритическим флюидом будет снижаться, а вязкость сверхкритического флюида будет возрастать, но и само отношение вязкостей будет влиять на гидродинамику потока. С увеличением давления система «углеводород – сверхкритический  $\text{CO}_2$ » будет переходить в однофазное состояние, гидродинамическая неустойчивость, связанная с прорывами  $\text{CO}_2$ , будет снижаться.

Приведем график зависимости остаточной насыщенности пористой среды керосином от симплекса подобия  $\pi_4$  на двух изотермах – 313 и 353 К (рис. 3). Отношение вязкостей рассчитано для давлений до 25 МПа.

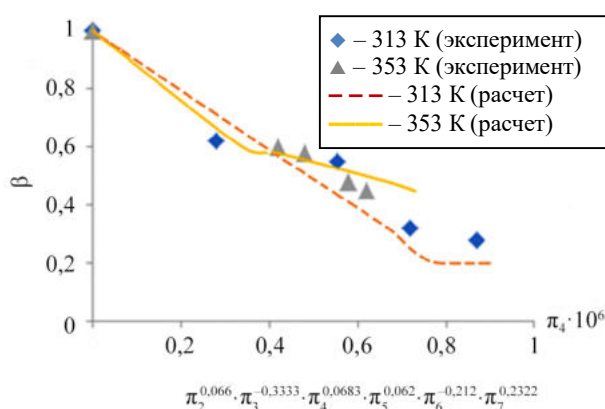


Рис. 3

Как видим (см. рис. 3), в случае симплекса  $\pi_4$  на изотерме 313 К наблюдается явно выраженная область, в которой график зависимости выходит на плато и в дальнейшем не изменяется. Выход графика на плато можно объяснить тем, что с увеличением давления вязкость  $\text{CO}_2$  продолжает повышаться, а динамическая вязкость углеводорода, насыщенного сверхкритическим флюидом, достигнув значения 0,76 мПа·с при давлении 24 МПа на изотерме 313 К, как показал расчет, практически не изменяется, что говорит о том, что выше 24 МПа на изотерме 313 К можно достигнуть области автомодельности по этому критерию. Напротив, на изотерме 353 К область автомодельности по критерию  $\pi_4$  не наблюдается, так как расчетная кривая не выходит на плато.

Таким образом, результаты описания экспериментов показали, что порометрические характеристики пористой среды в исследованных пределах значительно не влияют на конечную нефтеотдачу, а теплофизические свойства сверхкритического флюида и его растворимость в углеводороде, наоборот, оказывают влияние.

Таким образом, методом масштабных преобразований дифференциальных уравнений математической модели, описывающей процесс нестационарной фильтрации системы «углеводород – сверхкритический флюид», получены безразмерные симплексы подобия и критериальное уравнение. Также получена безразмерная зависимость остаточной насыщенности пористой среды от безразмерных симплексов подобия. Показано влияние каждого симплекса подобия на конечное значение остаточной насыщенности пористой среды углеводородом.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бриджмен П. Анализ размерностей. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001. 148 с.
2. Уздин В.М. Математическое моделирование метода анализа размерностей. СПб.: Ун-т ИТМО, 2019. 28 с.

3. Сушкин И.Н. и др. Теплотехника (курс общей теплотехники). М.: Металлургия, 1973. 480 с.
4. Кутрунов В.Н. Математическая модель процесса вытеснения нефти водогазовой смесью // Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. № 2. С. 163–172.
5. Авербух А.Г. и др. Методические указания по созданию постоянно действующих геолого-технологических моделей нефтяных и газонефтяных месторождений. Ч. 1. Геологические модели. М.: ОАО ВНИИОЭНГ, 2003. 164 с.
6. Savioli G.B., Bidner M.S. Simulation of the Oil and Gas Flow Toward a Well – A Stability Analysis // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2005. № 48. P. 53–69.

Поступила в редколлегию 13.05.25

## SIMILARITY OF FILTRATION PROCESS OF HYDROCARBON – SUPERCRITICAL FLUID SYSTEMS IN HOMOGENEOUS POROUS MEDIUM

A.V. Radaev, A.N. Sabirzyanov, and N.A. Vaseneva

A mathematical model of the process of one-dimensional non-stationary filtration of the hydrocarbon-supercritical fluid system in a homogeneous porous medium in a single-phase and two-phase formulation has been developed. By the method of scale transformations of differential equations of the mathematical model, similarity simplexes were obtained and a criterion equation was developed that allows generalizing 95% of experimental results with a standard deviation of not more than 13.8%. The effect of the developed similarity simplexes on the residual saturation of the porous medium with hydrocarbon during non-stationary filtration of the hydrocarbon-supercritical fluid system in a homogeneous porous medium was analyzed.

**Keywords:** filtration, scale transformation, differential equations, similarity theory.

---

**Радаев Андрей Викторович** – канд. техн. наук (АГТУ ВШН, Альметьевск)  
E-mail: radaev\_neftianik@mail.ru

**Сабирзянов Айдар Назимович** – д-р техн. наук (КНИТУ, Казань)  
E-mail: sabirs@kstu.ru

**Васенева Надежда Анатольевна** – ст. преподаватель (АГТУ ВШН, Альметьевск)  
E-mail: v-nadezhda@list.ru

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ ПЕН КАРБОНИЗАЦИЕЙ ПЕКОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Э.Р. Галимов, Э.Э. Шарафутдинова, Н.Я. Галимова

Разработана технология получения теплопроводных углеродных пен карбонизацией нефтяных пеков под давлением, основанная на использовании эффекта порообразования при выходе из них летучих веществ. Описаны основные этапы многостадийного технологического процесса. Приведены результаты исследования структуры, физико-механических и теплофизических свойств пен, полученных с использованием различных видов пеков, в том числе специальных пеков с добавлением мезофазных микросфер.

**Ключевые слова:** углеродные пены, пеки, мезофазные микросферы, технология получения, структура, физико-механические и теплофизические свойства.

В последние десятилетия в области материаловедения проводятся исследования, направленные на разработку сверхлегких материалов в виде углеродных пен с уникальными свойствами – высокими удельными прочностными характеристиками, регулируемым в широком диапазоне коэффициентом теплопроводности, электропроводностью, высокой тепло- и термостойкостью, устойчивостью к воздействию различных агрессивных сред и др. [1–4]. Существуют разнообразные способы получения углеродных пен открыто-пористой структуры с различными физико-механическими, теплофизическими и другими функциональными свойствами [2].

Целью данной работы является разработка технологии получения углеродных пен с использованием в качестве исходных компонентов нефтяных пеков, исследование структуры, физико-механических и теплофизических свойств пен.

Исследование структуры пен проводили на сканирующем электронном микроскопе марки Hitachi TM3000 на образцах в виде куба с размерами  $10 \times 10 \times 10$  мм. На снимках, сделанных сканирующим электронным микроскопом, производили замеры линейных размеров ячеек и толщины стенок ячеек образцов пены, оценивали геометрию ячеек, описывали морфологию поверхности, распределение ячеек по размерам. Образцы закрепляли непосредственно на проводящий углеродный скотч. Исследовали свежие сколы образцов при следующих режимах съемки с 60–3000-кратным увеличением: ускоряющее напряжение – 15 кВ, вакуум –  $133,32 \cdot 10^{-6}$  Па, рабочий ток – 150 нА. Коэффициент теплопроводности пен оценивали с использованием призматических образцов с размерами  $10 \times 10 \times 10$  мм по методике [3]. Кажущуюся плотность определяли с использованием образцов размерами  $10 \times 10 \times 10$  мм по стандартной методике [3]. Испытания прочностных свойств пен проводили на испытательной машине Zwick/Roell Z250. Предел прочности при сжатии определяли с использованием образцов с размерами  $20 \times 10 \times 10$  мм. Образцы равномерно нагружали со скоростью 10 мм/мин до разрушения или уменьшения высоты до 90 % от первоначального значения. Твердость по Виккерсу определяли по стандартной методике с использованием образцов размерами  $10 \times 10 \times 10$  мм при нагрузке 980 Н в течение 10–15 с [3, 4].

Предлагаемый способ основан на получении пен с использованием эффекта порообразования при выходе летучих веществ из каменноугольных или нефтяных пеков, выход которых затруднен за счет приложения внешнего давления. Технология получения пен включала следующие операции: смешивание компонентов, низкотемпературная карбонизация под давлением, карбонизация, графитация, пироуплотнение, механическая обработка.

При смешивании компонентов в качестве исходного компонента использовали пек, имеющий выход мезофазы до 25 мас. %. Для увеличения выхода мезофазы из пека до 40–50 мас. % и повышения теплопроводности пен в композиции добавляли мезофазные микросферы марки ПМУГ, полученные

термообработкой исходного пека до температуры мезофазообразования (400–500 °С) с последующей экстракцией растворимой части в толуоле. Для повышения прочности заготовок пен в исходный пек добавляли углеродные микро- и наночастицы (тонкоизмельченная сажа, природный графит, графеновые наночастицы) в количестве 0,1–5,0 мас. %.

На начальном этапе в круглодонную колбу загружали исходный пек, указанные добавки и толуол из расчета 100 мл растворителя на 15 г пека и при перемешивании с использованием якорной мешалки кипятили с обратным холодильником в течение 60 мин. Затем композицию охлаждали до 40 °С и удаляли толуол отгонкой под вакуумом. Композицию сушили под вакуумом на роторном испарителе при остаточном давлении 1333,2 Па и температуре 120 °С в течение 60 мин. Полученную массу охлаждали до комнатной температуры и проводили ее измельчение на вибромельнице до размера частиц 250 мкм.

Для проведения низкотемпературной карбонизации под давлением пресс-массу измельченного пека с добавками помещали в стальную цилиндрическую форму, которую помещали в автоклав с температурой нагрева 600 °С и давлением 16 МПа.

Режим изменения давления приведен на рис. 1, а, температуры – на рис. 1, б.

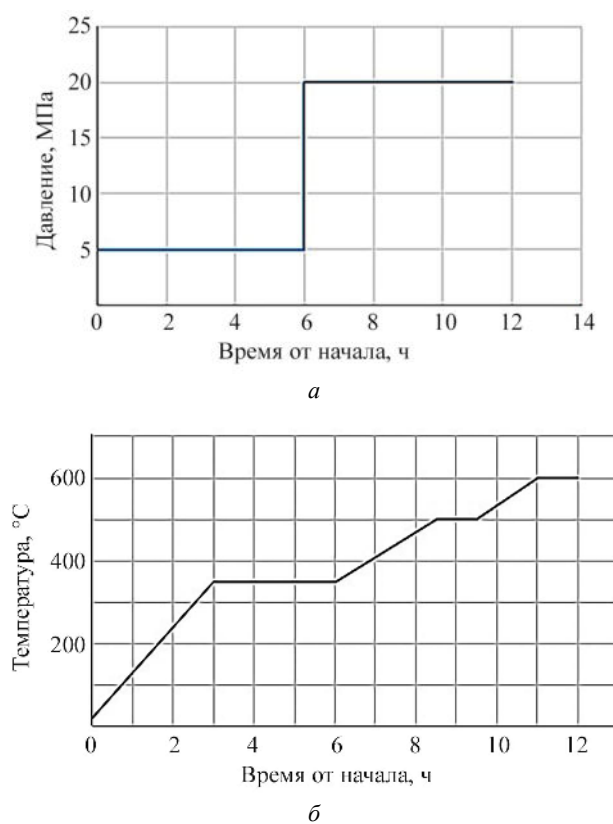


Рис. 1

После естественного охлаждения рабочей зоны автоклава до температуры 450 °С давление снижали до атмосферного, затем охлаждали рабочую зону автоклава и извлекали контейнеры с образцами зеленой пены.

Для проведения процесса карбонизации заготовки зеленой пены заворачивали в бумагу, помещали в стальной контейнер, засыпали слоем графитированного боя, сверху дополнительно насыпали слой высокотемпературного каменноугольного пека, накрывали стальной крышкой и помещали в муфельную печь, снабженную терморегулятором с возможностью контроля скорости нагрева, температуры нагрева и времени выдержки. Образцы в контейнере нагревали до 900 °С и выдерживали в течение 120 мин, после чего печь выключали и охлаждали до 60±40 °С в течение 12 ч. Затем образцы извлекали и помещали в графитовые тигли с крышками, насыпали засыпку в виде брака производства искусственных графитов.



Тигли помещали в электровакуумную печь, откачивали внутреннее пространство печи до давления менее 133,32 Па. Печь в течение 8 ч нагревали до 2100 °С, выдерживали 2 ч и затем охлаждали естественным образом.

Для проведения процесса графитации заготовки пен помещали в графитовые тигли с крышкой, насыпали засыпку в виде брака искусственных графитов. Тигли помещали в печь графитации, нагревали до 2700 °С, выдерживали в течение 60 мин и извлекали графитированные образцы.

Для проведения пироуплотнения заготовки графитированной пены загружали в камеру печи пироуплотнения, которую герметизировали, продували аргоном, после чего образцы нагревали и выдерживали при 1100 °С, давлении метана 13332 Па в течение 20–120 ч.

На завершающей стадии технологического процесса проводили механическую обработку заготовок пен для получения образцов необходимых размеров.

В данной работе проведено исследование физико-механических свойств образцов пен, полученных с использованием трех видов пеков: нефтяной пиролизный пек с температурой размягчения 140 °С (образец 1); нефтяной пек с добавкой 10 мас. % мезофазных микросфер (образец 2); специальный нефтяной пек с содержанием мезофазы более 80 масс. % (образец 3).

В таблице приведены результаты исследования физико-механических свойств пен, полученных методом карбонизации под давлением.

Номер образца	Прочность при сжатии, МПа	Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	Твердость по Виккерсу	Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup>
1	26,00	139,5	8,35	1,07
2	27,50	140,5	8,45	1,04
3	32,85	162,0	7,65	0,95

При сравнении теплофизических и физико-механических свойств трех исследованных партий углеродных пен выявлено, что образец 3, изготовленный из специального мезофазного пека, отличается более высокой теплопроводностью, прочностью, пониженной твердостью, что свидетельствует о более высокой степени совершенства структуры. Сравнение образцов 1 и 2 показало, что значения характеристик образца 2 (предел прочности при сжатии и коэффициент теплопроводности) выше, что свидетельствует о положительном влиянии добавок мезофазных микросфер на совершенствование структуры пен.

Данные исследований структуры образцов углеродных пен методом сканирующего электронного микроскопа приведены на рис. 2. Можно отметить, что с точки зрения микроструктуры во всех исследованных образцах наблюдаются сферические поры с характерными размерами 300–500 мкм и толщиной межпоровых стенок 50–150 мкм. Текстура межпоровых стенок пен различна: образец 1 (рис. 2, а, б) имеет квазиизотропную структуру графита, у образцов 2 (рис. 2, в, г) и 3 (рис. 2, д, е) структура струйчатая и выражено анизотропная, что также косвенно указывает на более высокую степень графитации и ориентирующее влияние мезофазных микросфер.

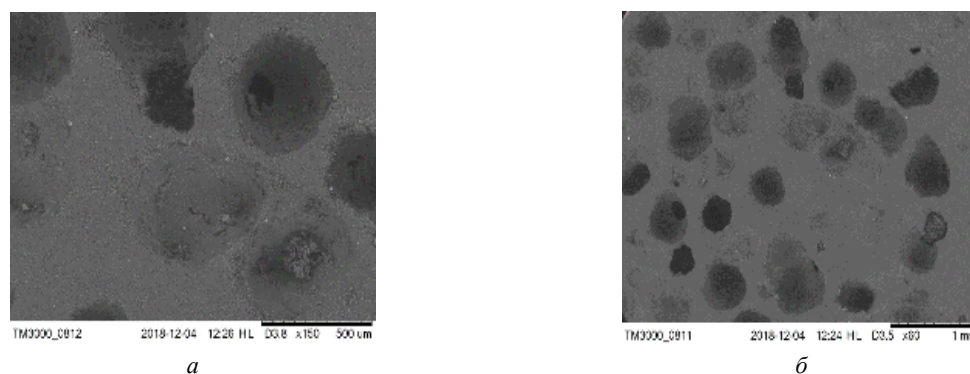


Рис. 2 (Начало)

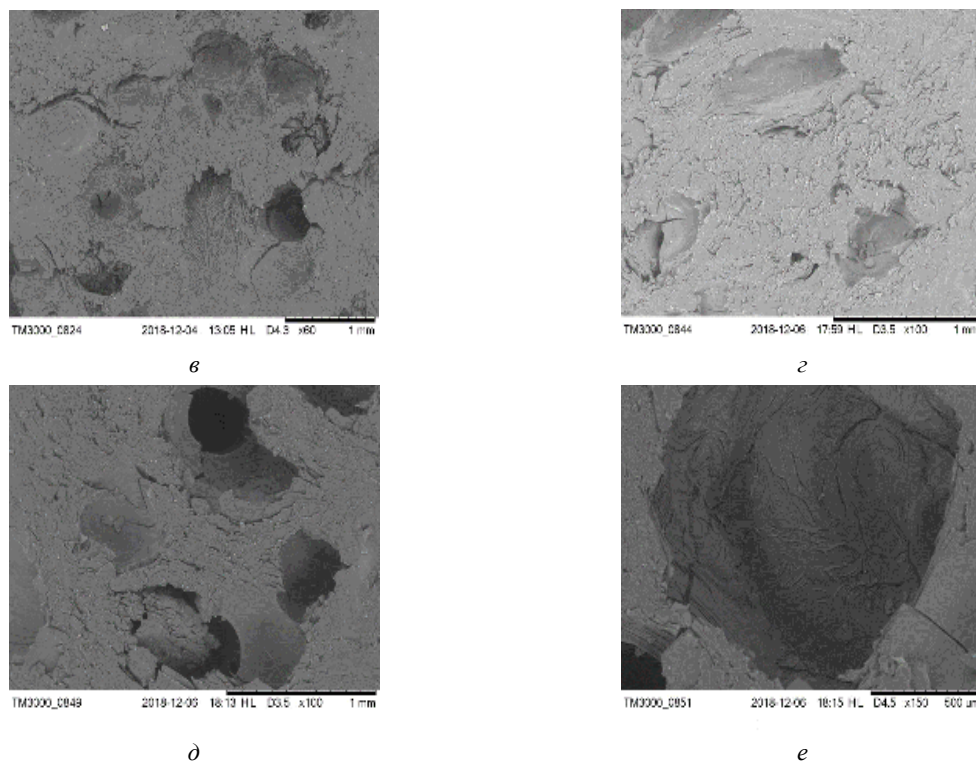


Рис. 2 (Окончание)

Таким образом, обобщая полученные результаты исследования свойств и структуры углеродных пен, можно отметить, что пены, полученные методом карбонизации под давлением, характеризуются более высокими значениями прочностных свойств и коэффициента теплопроводности, в сравнении с пенами, полученными другими способами, описанными в работах [2, 3]. Структура пен характеризуется высокой пористостью и степенью графитации, а также развитой системой щелевидных микро- и мезопор. Графитовые стенки пор явно текстурированы, что обеспечивает высокий уровень теплопроводности. Макропоры представляют собой каналы круглого или эллиптического сечения вследствие особенностей выхода порообразователя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колокольцев С.Н. Углеродные материалы. Свойства, технологии, применения. Долгопрудный: Интеллект, 2012. 296 с.
2. Тихомиров В.К. Пены. Теория и практика их получения и разрушения. М.: Химия, 1975. С. 11–15.
3. Галимов Э.Р. и др. Синтактические углеродные пены: получение, структура, свойства, применение. Казань: Изд-во АН РТ, 2022. 324 с.
4. Galimov E.R., Sharafutdinova E.E., Galimova N.Ya. Development of Technologies for Producing Heat-Conducting Syntactic Carbon Foams with Specified Operational Properties // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 570. Article № 012023.

Поступила в редколлегию 16.04.25

## DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR PRODUCING CARBON FOAM BY CARBONIZATION OF PITCHES UNDER PRESSURE

E.R. Galimov, E.E. Sharafutdinova, and N.Ya. Galimova

A technology for producing heat-conducting carbon foams by carbonization of petroleum pitches under pressure has been developed, based on the use of the pore formation effect when volatile substances are released from them. The main stages of the multi-stage technological process are described. The results of studying the structure, physical-mechanical and

thermal-physical properties of foams obtained using various types of pitches, including special pitches with the addition of mesophase microspheres, are presented.

**Keywords:** carbon foams; pitches; mesophase microspheres; production technology; structure; physical, mechanical and thermal properties.

---

**Галимов Энгель Рафикович** – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: kstu-material@mail.ru

**Шарафутдинова Эльмира Энгелевна** – канд. психол. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: elechkaneo@yandex.ru

**Галимова Назира Яхиевна** – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: kstu-material@mail.ru

## СТРУКТУРА И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ ПЕН, ПОЛУЧЕННЫХ КАРБОНИЗАЦИЕЙ ПЕКА В ПРИСУТСТВИИ ПОРООБРАЗОВАТЕЛЯ

Э.Р. Галимов, Э.Э. Шарафутдинова, Н.Я. Галимова

Разработана технология получения углеродных пен методом карбонизации каменноугольного пека с добавлением летучего порообразователя и структурирующей добавки. Показано влияние содержания и гранулометрического состава порообразователя, а также температуры термической обработки на структуру и изменение теплофизических характеристик пен.

**Ключевые слова:** углеродные пены, летучий порообразователь, структурирующая добавка, гранулометрический состав, технология получения, структура, термическая обработка, коэффициент теплопроводности.

В современной технике широко применяются углеродные материалы, особенно материалы пенистой структуры в виде углеродных пен с регулируемым в широком диапазоне коэффициентом теплопроводности, высокой тепло- и термостойкостью, устойчивостью к действию агрессивных сред [1–4].

Целью исследования является разработка технологии получения теплопроводных углеродных пен с использованием в качестве исходных компонентов каменноугольного пека и летучего порообразователя, а также исследование структуры и теплопроводности получаемых материалов.

Исследование структуры и теплопроводности пен проводили по методикам [3]. Пены получали совместным вибропомолом высокотемпературного каменноугольного пека, поваренной соли и (для некоторых образцов) структурирующей добавки в виде природного графита (5 мас. %) с последующим прессованием композиций в глухую матрицу при температуре 40–60 °С и давлении 12 МПа. Полученные заготовки пен в виде полуфабрикатов подвергали низкотемпературной и высокотемпературной карбонизации при 900 и 2100 °С в электровакуумной печи с последующей графитацией при 2800 °С в инертной среде в печи специальной конструкции. При реализации технологии в процессе ступенчатой термической обработки композиций происходит плавление и последующее испарение порообразователя, приводящее к формированию пористой структуры материала.

Приведем снимки СЭМ углеродных пен, полученные при помощи сканирующей электронной микроскопии, при различных степенях увеличения:  $\times 400$  (рис. 1, а);  $\times 800$  (рис. 1, б);  $\times 1200$  (рис. 1, в);  $\times 2000$  (рис. 1, г). На снимках отчетливо видны кристаллиты размером до нескольких микрометров. Микропоры размером порядка 10 мкм имеют вид каналов, формирование которых обусловлено испарением порообразователя в процессе реализации технологического процесса получения пен, причем размер образующихся пор на порядок меньше, чем размер частиц порообразователя (100–250 мкм), что свидетельствует, по-видимому, о протекании вторичных микромеханических процессов в процессе графитации образцов пен (релаксация трещин, ползучесть).

На рис. 2 представлены данные по изменению коэффициента теплопроводности пен в зависимости от содержания порообразователя. Как видим (см. рис. 2), по мере увеличения содержания порообразователя наблюдается монотонное снижение коэффициента теплопроводности, причем для композиции, содержащей структурообразующую добавку, характерно максимальное значение этого показателя (170 Вт/м·К).

Рис. 3 демонстрирует монотонное повышение коэффициента теплопроводности по мере увеличения температуры термообработки. Это в общем не характерно для искусственных графитов, для которых наблюдается плато в интервале 800...2200 °С и последующий резкий рост. Данный эффект может быть связан с облегчением графитации в тонких слоях на поверхности соли или пор, а также хорошими условиями теплопереноса при высоких температурах. Следует отметить, что образцы пен, полученные с использованием узкой фракции соли, отличаются повышенной теплопроводностью, что обусловлено большей равномерностью усадки и графитационных перестроек.

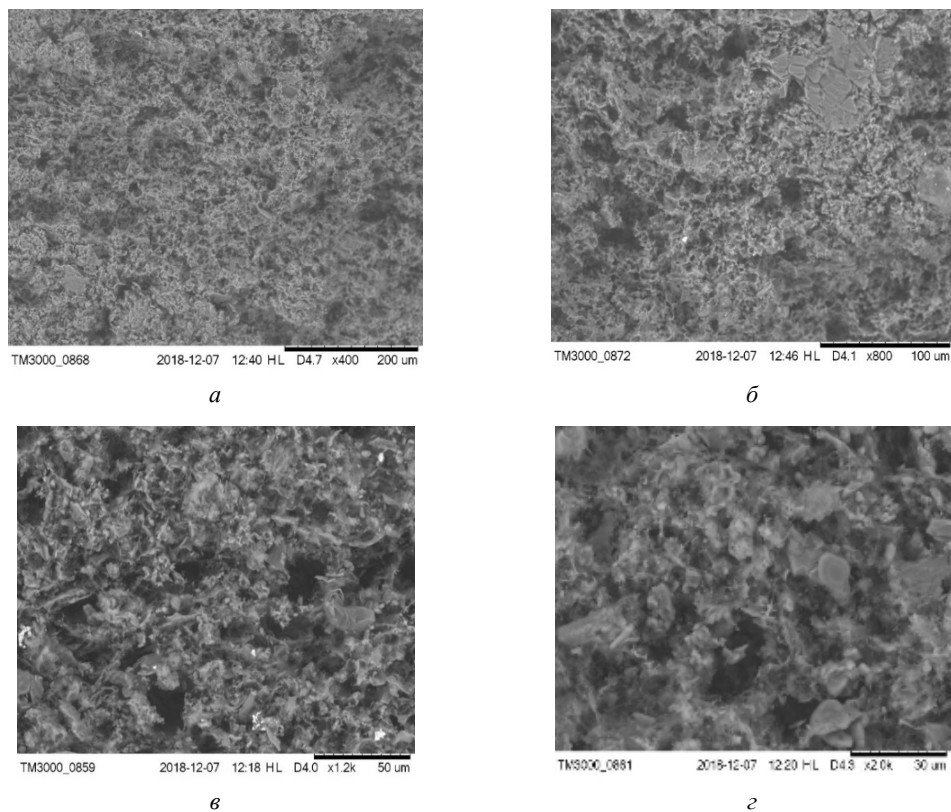


Рис. 1

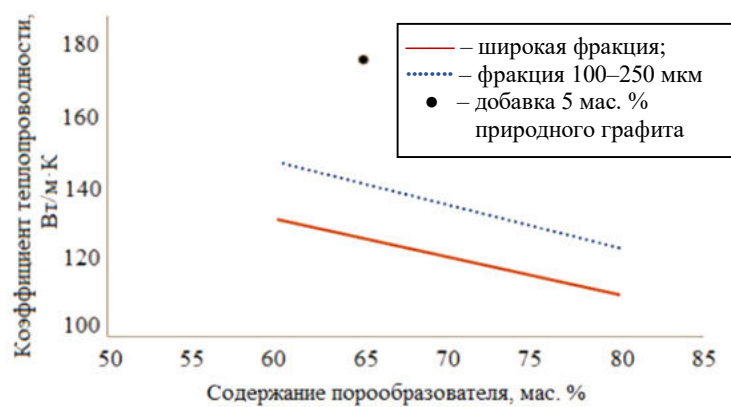


Рис. 2

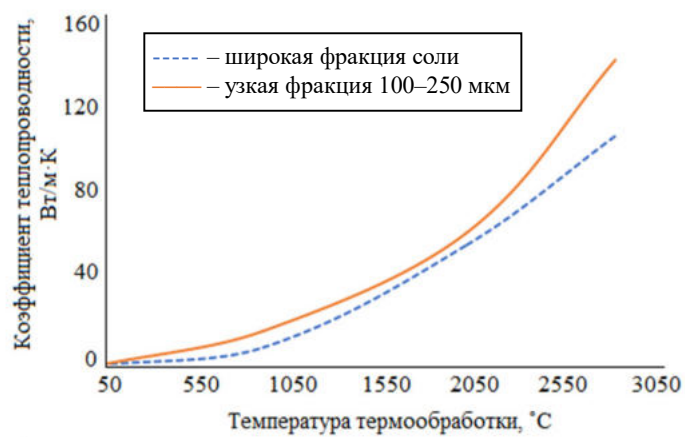


Рис. 3

Таким образом, углеродные пены, полученные по предложенной технологии, отличаются повышенной мелкой пористостью и высокой степенью графитации, для них характерна околосферическая форма ячеек и малый разброс размеров по диаметрам. Пены, полученные с использованием исходных компонентов, имеют высокие значения коэффициента теплопроводности (до 130 Вт/м·К), что обеспечивает возможность их применения во многих отраслях промышленности в качестве эффективных и сверхлегких теплопроводящих материалов [3, 4].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колокольников С.Н. Углеродные материалы. Свойства, технологии, применения. Долгопрудный: Интеллект, 2012. 296 с.
2. Галимов Э.Р. и др. Синтактические углеродные пены: получение, структура, свойства, применение. Казань: Изд-во АН РТ, 2022. 324 с.
3. Галимов Э.Р. и др. Синтактические углеродные пены: получение, структура, свойства, применение. Казань: Изд-во АН РТ, 2022. 324 с.
4. Galimov E.R., Sharafutdinova E.E., Galimova N.Ya. Development of Technologies for Producing Heat-Conducting Syntactic Carbon Foams with Specified Operational Properties // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. № 570. Article № 012023.

Поступила в редколлегию 16.04.25

## STRUCTURE AND THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF CARBON FOAM OBTAINED BY CARBONIZATION OF PITCH IN THE PRESENCE OF A FOAMING AGENT

E.R. Galimov, E.E. Sharafutdinova, and N.Ya. Galimova

A technology has been developed for producing heat-conducting carbon foams by carbonization of coal tar pitch with the addition of a volatile blowing agent and a structuring additive. The effect of the blowing agent content and granulometric composition, as well as the heat treatment temperature, on the structure and change in the thermal characteristics of the foams has been shown.

**Keywords:** carbon foams, volatile blowing agent, structuring additive, granulometric composition, production technology, structure, heat treatment, thermal conductivity coefficient.

---

**Галимов Энгель Рафикович** – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)  
E-mail: kstu-material@mail.ru

**Шарафутдинова Эльмира Энгелевна** – канд. психол. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)  
E-mail: elechkaneo@yandex.ru

**Галимова Назира Яхиевна** – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)  
E-mail: kstu-material@mail.ru

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КЛАССИФИКАТОР ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ВЫБОРА МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ С ЧПУ В УСЛОВИЯХ СЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**В.В. Епифанов**

Предложен классификатор деталей для выбора рационального металлорежущего оборудования. Выбор металлорежущего станка с ручным или программным управлением осуществляется по коду детали в зависимости от ее сложности. Кодирование конструктивных признаков детали производится по классификатору ЕСКД, а технологических признаков в истинных значениях – по чертежу.

**Ключевые слова:** станок, деталь, кодирование, классификация, автоматизация, система.

Механическая обработка металлов и других материалов играет ключевую роль в производстве деталей для авиационной отрасли, где требуется высокая точность, надежность и долговечность компонентов, поскольку любые дефекты могут вызвать серьезные последствия. В авиастроении широко применяется фрезерно-сверлильная обработка деталей планера, в том числе крупногабаритных, в основном плоскостных деталей (шпангоуты, лонжероны, обшивки длиной 35–46 м), токарная обработка деталей шасси, салона, особенно двигателя, шлифовальная обработка деталей из титановых сплавов. Согласно данным статистических исследований по геометрическим характеристикам деталей наиболее широко в промышленности распространены плоскостные детали (43,5 %), детали вращения (30,8 %), корпусные детали (6,8 %).

Выбор эффективного технологического оборудования в условиях авиационной отрасли, где изготавливается широкая номенклатура деталей, является достаточно сложной задачей. Сложность задачи обоснования характеристик нового оборудования или выбора рационального существующего оборудования для условий мелкосерийного и серийного производства обусловлена большим числом факторов, влияющих на решение указанной задачи. К таким факторам относится многообразие схем построения технологических операций, наличие технологического оборудования с разными технологическими возможностями и системами управления, множество характеристик подлежащих обработке деталей: конструктивно-геометрическая форма, габаритные размеры, материал и метод получения заготовки, точность и шероховатость поверхностей, масса, термообработка, трудоемкость, программа выпуска и др. [1].

Основным технологическим оборудованием на машиностроительных предприятиях являются металлорежущие станки. В мелкосерийном и серийном производстве применяются универсальные металлорежущие станки с ручным управлением и металлорежущие станки с ЧПУ, реже металлорежущие станки-автоматы. Выбору металлорежущих станков для определенных производственных условий должен предшествовать тщательный технико-экономический анализ. Например, исследование эффективности использования двадцати тысяч металлорежущих станков с ЧПУ в США, Англии, Франции показало, что только 40 % из них были выбраны правильно и использовались рационально [2].

Выбор оборудования на предприятиях на основе расчетов экономической эффективности осуществляется редко из-за высокой трудоемкости расчетов и возможности сравнения одновременно только двух вариантов [3]. В связи с этим актуальна разработка технологического классификатора деталей для оперативного выбора рационального металлорежущего оборудования без выполнения трудоемких расчетов. Классификатор составит основу алгоритма и автоматизированной системы по выбору металлорежущих станков для определенных производственных условий.

В СССР и Российской Федерации было создано достаточно много локальных классификаторов деталей. Например, в Ульяновском авиационном промышленном комплексе (в настоящее время филиал ПАО «ИЛ»-Авиастар) в 1980-е гг. был создан классификатор деталей для технологической подготовки производства, в том числе реализации групповой технологии. Примерно в то же время был разработан общесоюзный классификатор деталей ЕСКД.



Для принятия оперативного решения по подбору деталей, которые экономически целесообразно изготавливать на станках с ручным управлением или ЧПУ только на основании чертежа детали или соответствующего ее кода, предложено использовать классификатор деталей, в котором конструктивные признаки детали формализуются с помощью классификатора ЕСКД (К.ЕСКД) [4] за счет присвоения им определенного кода (6 знаков). К.ЕСКД является единой классификационной обезличенной системой (независимо от названия, номера детали и др.) обозначения изделий и конструкторских документов машиностроения и приборостроения.

Каждой детали по К.ЕСКД соответствует только один классификационный вид, цифровой код которого получается в результате последовательного кодирования характеристик деталей по классификационным группировкам. Классификационные группировки наиболее широко распространенных классов деталей показаны в табл. 1.

Таблица 1

Классификационная группировка К.ЕСКД	Количество знаков	Характеристика конструкторского признака детали	
		Класс 74	Класс 71
Класс	XX	Детали не тела вращения (плоскостные, аэродинамические, изогнутые из листов, полос и др.)	Детали вращения (втулки, фланцы, валы, оси, шпиндели и др.)
Подкласс	X	Геометрия и взаимное расположение основных плоскостей	Параметрический признак (соотношение длины и диаметра и форма наружной поверхности (цилиндрическая, коническая, комбинированная)
Группа	X	Геометрия контура в плане, профиль и расположение изгибов	Структура наружной поверхности (гладкая, ступенчатая и т.д.)
Подгруппа	X	Параметрический признак (соотношение длины и ширины детали)	Форма и структура внутренней поверхности (отверстия)
Вид	X	Отсутствие или наличие отверстий, пазов, характеристики полок	Дополнительные элементы (пазы, лыски, шлицы, внецентровые отверстия и др.)

Рассмотрена концепция выбора рационального металлорежущего станка на основе конструктивно-технологической сложности подлежащих обработке деталей. При этом предложено формализовать конструктивно-технологическую сложность детали через число формообразующих координат  $\Phi_k$ , реализуемых исполнительными органами металлорежущего станка для обработки различных поверхностей деталей [5]. В этом случае число формообразующих координат является параметром металлорежущего станка, от которого зависят технологические возможности оборудования и другие его потребительские свойства (материало- и энергоемкость, габаритные размеры и др.), и самое главное, стоимость станка. Необходимо реализовать следующую цепь данных: код детали – число формообразующих координат – модель станка.

На первом этапе рассмотрим указанный подход на примере деталей вращения, на втором этапе для плоскостных деталей.

На основе анализа металлорежущего станка с ручным управлением и ЧПУ установлено, что металлорежущие станки для обработки деталей тел вращения (фланцы, крышки, валы, шпиндели и др.) могут реализовать от двух до восьми основных формообразующих координат  $\Phi_k$ , к которым относятся перемещения исполнительных органов станка (суппортов) относительно станины [6].

По расчетам приведенных затрат на обработку деталей установлено, что при обработке заготовок групп простых деталей сложностью  $\Phi_k$  от 1 до 3 выгоднее использовать металлорежущий станок с ручным управлением, в то время как для сложных деталей ( $\Phi_k = 4 \div 8$ ) эффективнее применение металлорежущего станка с ЧПУ. При этом, если затраты на обработку группы деталей средней сложности  $\Phi_k = 4$  на металлорежущем станке с ЧПУ снизились на 15–20 %, в сравнении с обработкой на металлорежущем станке с ручным управлением, то с увеличением сложности деталей до  $\Phi_k = 5 \div 8$  отмечено более значимое снижение трудоемкости (20–100 %) [7]. Это объясняется тем, что при обработке на станках с ручным управлением группы заготовок сложных деталей увеличивается основное время и еще



значительнее вспомогательное время вследствие большого количества переналадок, настроек, смены инструмента, контроля, в то время как на металлорежущем станке с ЧПУ обработка таких заготовок может быть выполнена за один или два установка.

Для выбора металлорежущего станка с ручным управлением или ЧПУ установим взаимосвязь между конструктивно-технологической сложностью детали, выраженной через число формообразующих координат  $\Phi_k$  станка, и кодом детали по К.ЕСКД (табл. 2). Дополнительные элементы – пазы, внецентровые отверстия, скосы и др.

Таблица 2

Примеры классификационных групп по К.ЕСКД	Количество координат металлорежущего станка	Характеристика обрабатываемых поверхностей	Тип металлорежущего станка	Вид обработки
711111-711798; 712111-712798	2	Цилиндрические, наружные и внутренние гладкие поверхности конструктивно простых деталей	Токарный станок с ручным управлением	Токарная
711311-711391; 713315-713395	4	Цилиндрические наружные и внутренние ступенчатые поверхности конструктивно сложных деталей	Токарный станок с ЧПУ	Токарная, расточная
712312- 712394; 712316-71298	6	Цилиндрические, конические, криволинейные наружные и внутренние ступенчатые поверхности конструктивно сложных деталей	Многоцелевой станок с ЧПУ	Токарная, расточная, сверлильная
712312-712394; 712315-712398	8	Цилиндрические, конические, криволинейные наружные и внутренние ступенчатые поверхности конструктивно сложных деталей с пазами, шлицами, внецентровыми отверстиями, скосами	Обрабатывающий центр с ЧПУ	Токарная, расточная, фрезерная, сверлильная

Таким образом, на первом этапе конструкторско-геометрические характеристики детали кодируются по К.ЕСКД.

Кроме конструктивных признаков необходимо учесть технологические характеристики. По габаритным размерам детали определяют размер рабочего пространства металлорежущего станка (типоразмер), а по точности – класс точности станка. Технологические признаки (габаритные размеры, точность, материал, заготовка и др.) в классификаторе деталей представлены в основном не в кодовом обозначении, а в истинных значениях характеристик с чертежа детали (табл. 3).

Таблица 3

Характеристика детали	Значение на чертеже	Код
Габаритные размеры	Длина – 220 мм; диаметр – 43 мм	220; 43
Материал	Сталь конструкционная углеродистая – сталь 45	45
Наименьший квалитет точности	7-й квалитет – Н7	Н7
Минимальная шероховатость	$R_a$ 1,6	1,6
Вид заготовки	Прутки	Пр

В результате полный код детали в классификаторе для выбора оборудования содержит 18 знаков, из них конструкторский код – 6 знаков по классификатору ЕСКД, технологический код – 12 знаков.

Выбор размеров рабочего пространства станков должен определяться показателями их экономической эффективности при обработке заготовок определенной группы деталей. Например, для обработки заготовок деталей фланцев, крышек группы 713321 экономически целесообразно выбрать станки с одинаковыми технологическими возможностями, но с разными размерами рабочего пространства по максимальному диаметру обрабатываемых заготовок  $D$  [8]:

- станок с установкой заготовок  $D_1$  до 40 мм;
- станок с установкой заготовок  $D_2$  в диапазоне 40...125 мм.

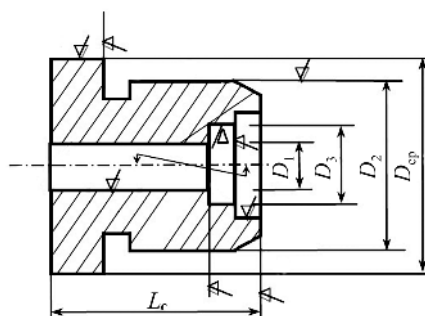
На основе анализа распределения деталей по точности размеров и шероховатости обрабатываемых поверхностей можно установить класс точности металлорежущего станка согласно ГОСТ 8 – 82Е.

Целесообразно разработать автоматизированную систему выбора рационального металлорежущего станка, состоящую из подсистем кодирования и классификации деталей, выбора металлорежущего станка и базы данных о металлорежущем станке с ручным управлением и ЧПУ [9].

В подсистеме кодирования и классификации деталей проектировщик осуществляет кодирование на основе эскиза (проекта) детали. На первом этапе кодируются конструктивно-геометрические характеристики. Кодирование осуществляется постановкой кодов в последовательно выводимые на экран ЭВМ меню. На втором этапе кодируются технологические характеристики детали в истинных значениях за счет ответов на вопросы. Например: «Введите минимальную шероховатость поверхности  $R_a$ ». Ответ: 2,5.

После завершения этапа кодирования и классификации деталей на предприятии в подсистеме выбора металлорежущего станка из базы данных автоматически выбираются группы оборудования с ручным управлением или ЧПУ. Затем пользователь по дополнительным характеристикам (например, цена металлорежущего станка) выбирает конкретный металлорежущий станок.

Например, деталь, представленная на рисунке, получила конструкторский код по К.ЕСКД – 713321 и технологический код (условно) 220 43 45 Н7 1,6 Пр. Для ее обработки экономически целесообразно выбрать металлорежущий станок из группы токарных двухсуппортных станков с ЧПУ, реализующих четыре формообразующие координаты ( $X$ ,  $Z$ ,  $U$ ,  $W$ ) при последовательно-параллельной многоместной схеме построения технологической операции.



Для обработки данных деталей предлагаем следующие модели станков: 16А20Ф3 NC210 (1650000 руб.), TC1625Ф3 (2150000 руб.), AC16Л25Ф3 (2200000 руб.), MetalTec NEXT (2447900 руб.), Orson 6150 (2500000 руб.).

По данным габаритных размеров и точности поверхностей деталей, а также стоимости из базы данных автоматизированной системы выбора рационального металлорежущего станка можно выбрать металлорежущий станок с ЧПУ рационального типоразмера и класса точности. Можно учитывать дополнительные показатели – мощность привода, габаритные размеры станка, тип системы ЧПУ и др.

Следует отметить, что металлорежущий станок с ЧПУ целесообразно выбирать не для одной конкретной детали, а на группу деталей, которой можно загрузить оборудование на определенный период времени. При этом с помощью классификатора возможно выбрать оборудование с рациональными технологическими возможностями для группы деталей определенной сложности.

На промышленных предприятиях благодаря применению автоматизированной системы выбора рационального металлорежущего станка существенно повышается производительность труда технологов при подготовке производства и качество принимаемых ими проектных решений.

Таким образом, предлагаемый классификатор деталей позволяет выбрать рациональное металлорежущее оборудование в условиях серийного производства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Галимов Р.А. и др. Автоматизация производства комплексами повышения эффективности работы оборудования // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2022. № 2. С. 32–36.
2. Кубланов В.Л. и др. Экономическое обоснование области применения металлорежущих станков с программным управлением. М.: Машиностроение, 1987. 152 с.

3. Вайс С.Д., Корниенко А.А. Оценка конкурентоспособных металлорежущих станков // СТИН. 2002. № 1. С. 8–12.
4. Классификатор ЕСКД. Классы 71, 72, 73, 74, 75. Иллюстрированный определитель деталей. М.: Изд-во стандартов, 1988. 401 с.
5. Епифанов В.В. Технологическое проектирование металлорежущих станков с ЧПУ // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. № 1. С. 34–40.
6. Дружинский И.А. Концепция конкурентоспособных станков. Л.: Машиностроение, 2010. 247 с.
7. Епифанов В.В. Эффективность использования технологического оборудования в зависимости от конструктивно-технологической сложности деталей // Вестник машиностроения. 2023. № 1. С. 43–50.
8. Епифанов В.В. Взаимосвязь параметров технологического оборудования с техническими характеристиками обрабатываемых деталей // Вестник машиностроения. 2021. № 5. С. 32–36.
9. Епифанов В.В., Афанасьев А.Н. Автоматизированная система кодирования и классификации объектов производства // Автоматизация процессов управления. 2017. № 3. С. 49–55.

Поступила в редколлегию 3.03.25

## TECHNOLOGICAL CLASSIFIER OF PARTS FOR THE SELECTION OF CNC METAL CUTTING EQUIPMENT IN MASS PRODUCTION CONDITIONS

V.V. Epifanov

A classifier of parts is proposed for the selection of rational metal-cutting equipment. The choice of a metal-cutting machine with manual or software control is carried out according to the part code, depending on its complexity. The coding of the design features of the part is performed according to the ESCD classifier, and the technological features in true values according to the drawing.

**Keywords:** machine tool, part, coding, classification, automation, system.

---

**Епифанов Вячеслав Викторович** – д-р техн. наук (УлГТУ, Ульяновск)  
E-mail: v.epifanov73@mail.ru

## ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Л.А. Симонова, М.Ф. Садыков

Проведена систематизация дефектов автомобилей на этапах жизненного цикла автомобиля. Предлагается создание интегрированной системы управления качеством и системы поддержки принятия решения с интеллектуальной надстройкой. Установлено, что после внедрения автоматизированной системы управления качеством появится возможность отследить дефект на всех этапах жизненного цикла автомобиля, а также возможность проверки эффективности внедренных мероприятий, направленных на устранение дефекта.

**Ключевые слова:** система управления качеством, систематизация дефектов, искусственный интеллект, жизненный цикл.

В настоящее время все большее число предприятий принимает решение о сертификации в части соответствия международным стандартам серии ИСО 9000 (система менеджмента качества), поскольку наличие сертификата дает возможность осуществлять поставки на внутреннем рынке и за рубеж.

Одним из главных принципов данной системы является ориентация на обеспечение удовлетворенности потребителя продукцией. Контроль состояния автотранспортных средств позволит придерживаться данного принципа и полностью удовлетворить потребности экономики страны в качественных транспортных услугах.

Для машиностроительного предприятия очень важна информация о функционировании автотранспортных средств в период их эксплуатации. Это позволит повысить безопасность перевозок и эффективность бизнеса в целом.

В настоящее время на многих автомобилестроительных предприятиях информация о состоянии автотранспортных средств на этапе эксплуатации приходит в виде рекламационных актов. Форма рекламационного акта не дает исчерпывающей информации о причине неисправности. При получении подобного рекламационного акта невозможно сформировать корректирующие мероприятия по недопущению дефекта в дальнейшем.

Необходимо, чтобы информация от конечных потребителей поступала к производителям продукции и поставщикам, при этом она должна быть представлена в удобной для обработки форме, позволяющей формулировать точные корректирующие действия.

Полученная информация о дефекте (неисправности) должна быть подробной для определения первопричины несоответствия (дефекта), т. е. должно быть обеспечено четкое прослеживание информации на всех этапах испытаний и эксплуатации автотехники. Лишь при выполнении этого условия появится возможность проведения корректирующих действий и дальнейшей проверки подтверждения эффективности внедренных мероприятий, направленных на улучшение качества и недопущение дефекта в дальнейшем. Кроме этого, необходимо проанализировать потенциальные отказы или отказы, случившиеся на сборке/испытаниях опытных автомобилей, чтобы своевременно провести предупреждающие действия (до появления самих несоответствий) и недопущения дефектов в серийном производстве [1].

Таким образом, появляется необходимость систематизации дефектов автомобилей (в машиностроительном производстве) с процессом жизненного цикла автомобиля. Только при этом условии возможно какой-либо признак неисправности сопоставить с одной или несколькими причинами, возникшими на конкретных этапах существования автотехники.

Для решения этих задач необходимо не просто обработать большое количество данных, но и правильно принять решение в каждом конкретном случае. Для этого необходимо не только интегрировать существующие информационные системы этапов жизненного цикла в единое поле, но и создать систему поддержки принятия решения с интеллектуальной надстройкой [2].

Создание интегрированной системы управления качеством (далее – система) позволит планировать корректирующие и предупреждающие действия на основе оценки показателей качества продукции на разных этапах жизненного цикла автотехники в рамках единой информационной системы, а также более динамично вносить корректировки в конструкцию автотехники с учетом информации, полученной от производства и эксплуатации автомобилей, из рекламационных актов.

Система должна взаимодействовать с другими базами данных, получать информацию от разных источников данных, которые включают 1С ГОА рекламации; анализ видов и последствий потенциальных отказов конструкции (DFMEA), которые размещены в базе данных; заключения по итогам пробной сборки автотехники, оформленные в Excel-формате; отчеты, полученные по итогам подконтрольной эксплуатации; базу с решениями электронных ошибок DM-1.

Система также должна накапливать данные из различных источников/информационных систем, управлять информацией о качестве поступающих комплектующих изделий от поставщиков, управлять информацией о дефектах автотехники от потребителей, предоставлять динамику изменений после внедренных мероприятий, определять рациональный объем мероприятий (работ) на образце в ходе его жизненного цикла, создать необходимую информационную базу для принятия решений по ранее выявленным дефектам, обеспечить оперативное реагирование на дефект (система должна сама предложить мероприятия [3]. При этом необходимо, чтобы система позволяла хранить информацию в разных форматах (xlsx, sql, фото/видеоматериалы, графики).

Основные требования к системе управления качеством приведены на рис. 1.

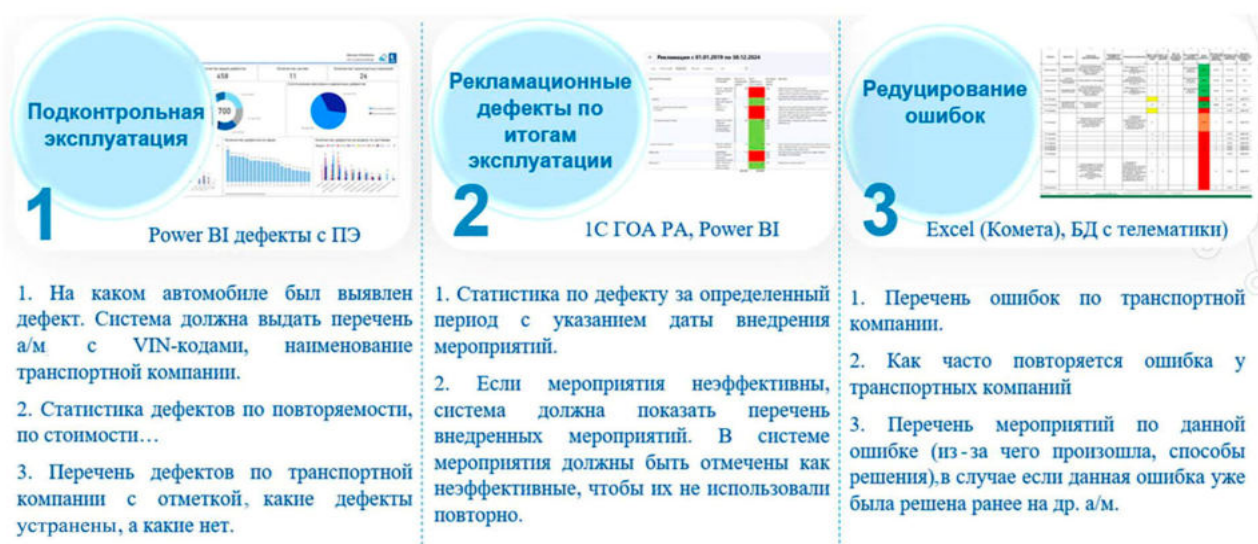


Рис. 1

Для определения причины появления дефекта необходимо проследить предысторию, на каком этапе жизненного цикла автомобиля возник дефект: на этапе разработки (сборки опытного образца), изготовления (сборки опытной партии/установочной серии) или эксплуатации (проведения контрольных испытаний/подконтрольной эксплуатации) [4].

На всех стадиях важна информация о повторении дефекта после внедренных мероприятий, важно понять, были внедренные мероприятия результативными или нет.

Система должны состоять из модулей (рис. 2).

Порядок работы с дефектным изделием приведен на рис. 3.

При обращении потребителя (эксплуатирующей организации автомобиля) производится регистрация обращения в 1С ГОА рекламации: фиксируется дата обращения, пробег на момент обращения, описание поломки/неисправности.

При проведении обследования (дефектовки) автотехники определяется дефектный узел. После этого проводится идентификация состава узла (проверка комплектности), затем идентификация признаков

обнаруженных несоответствий. По полученным данным определяется дефект, который регистрируется в системе. Далее проводится поиск причин возникновения дефекта (несоответствия) и определения виновника (дефект покупного изделия, конструкторский, производственный, технологический) и предлагаются корректирующие действия.

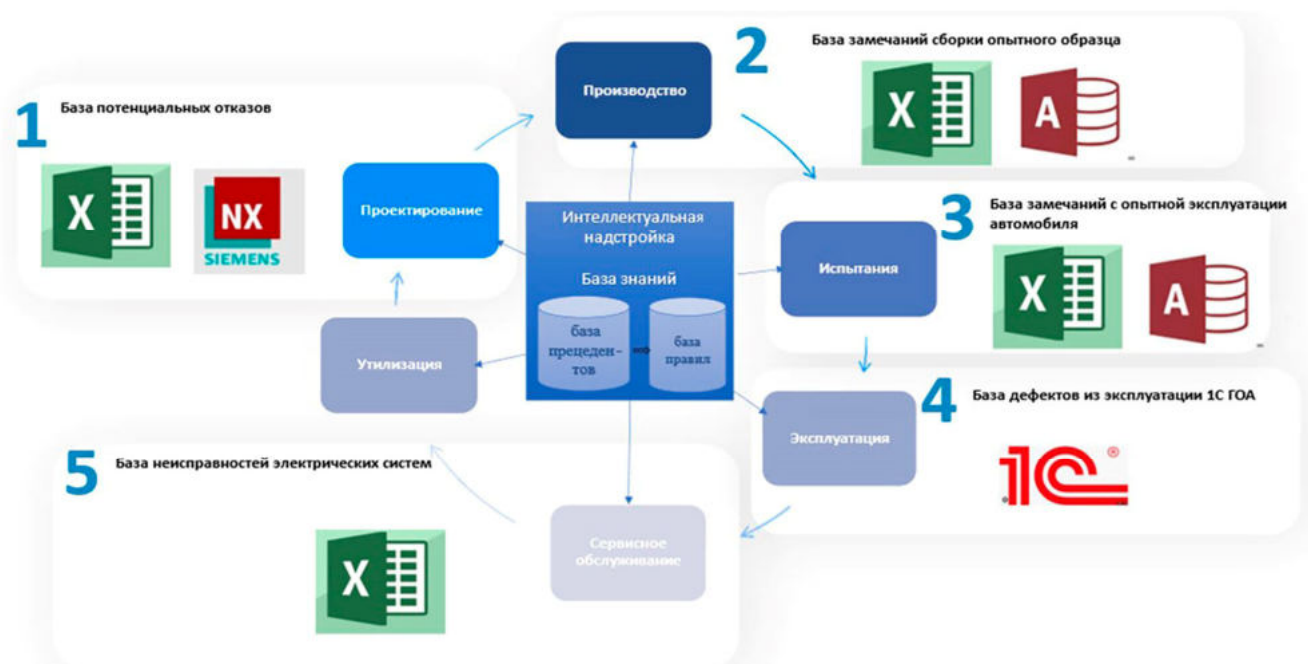


Рис. 2



Рис. 3

При прохождении определенного временного интервала система должна формировать отчет для анализа текущей ситуации о количестве дефектных узлов, сезонности возникновения дефекта, массовости и определения «вилки» возникновения дефекта («вилка» – конкретный интервал выпуска автотехники с дефектом).

На основе полученной информации формируется текущее состояние дефектов по узлам/агрегатам автотехники (рис. 4).

В отчетах должна отражаться зависимость количества дефектов от регионов, в которых эксплуатируется автотехника. В случае возникающих дефектов строится диаграмма Парето с целью определения

наиболее часто возникающих, а также диаграмма Парето, отражающая процентное соотношение дефектов у различных функциональных систем автотехники.



Рис. 4

По данным, поступающим в систему из производства за определенный промежуток времени, строится кривая нормального распределения, анализ которой, а также своевременное реагирование позволяют предупредить появление дефектов.

Для того чтобы сократить время рассмотрения рекламационного акта и упростить поиск возможных причин появления дефектов, необходимо выделить диагностические признаки каждого дефекта. При этом предполагается, что у одного дефекта есть только один диагностический признак на каждом уровне иерархии функциональных систем автотехники. Однако у одного и того же дефекта диагностические признаки на различных уровнях иерархии будут различны. В системе управления качеством должна храниться информация о том, где мог возникнуть тот или иной дефект.

После внедрения и использования автоматизированной системы управления качеством появится возможность отследить дефект на всех этапах жизненного цикла автомобиля, следовательно, возможность проверить эффективность внедренных мероприятий (рис. 5). Таким образом, повысится качество выпускаемой продукции в машиностроительном производстве [2].



Рис. 5



Внедрение интегрированной системы управления качеством с применением искусственного интеллекта позволит автоматизировать работу инженеров по качеству, автоматически формировать информацию об основных дефектах, этапе их возникновения и эффективности внедренных корректирующих мероприятий, а также на основе базы знаний своевременно выявить нарастающие дефекты, отклонения от нормы параметров, передаваемые автомобилем (телематической системой), и, соответственно, принять меры по недопущению дефекта, существенной поломки узлов автомобилей. Внедренная система сможет объединить все аспекты управления качеством на предприятии с учетом всех баз данных дефектов на всех этапах жизненного цикла от проектирования до испытаний автомобиля.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Симонова Л.А., Руднев М.П.* Интегрированное информационное обеспечение процесса управления технологическими маршрутами в рамках ERP-системы. М.: Academia, 2005. 284 с.
2. *Виноградская М.Ю., Кряжева Е.В., Солдатов К.И.* Современные информационные системы в управлении качеством на предприятии // Крымский научный вестник. 2021. № 1 (30). С. 16–22.
3. ГОСТ Р ИСО 900-2025. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2015. 27 с.
4. *Ефимов В.В.* Управление качества проектов и процессов. Ульяновск: УлГТУ, 2004. 185 с.

Поступила в редколлегию 28.04.25

## FORMATION OF AN INTEGRATED QUALITY MANAGEMENT INFORMATION SYSTEM AT THE STAGES OF THE LIFE CYCLE OF MOTOR VEHICLES

**L.A. Simonova and M.F. Sadykov**

The article is devoted to the systematization of automobile defects with the process of automobile life cycle. It is proposed to create an integrated quality management system and decision support system with intellectual superstructure. It is established that after the introduction of an automated quality management system – it will be possible to track the defect at all stages of the life cycle of the car, it will be possible to check the effectiveness of the implemented measures to eliminate the defect.

**Keywords:** quality management system, systematization of defects, artificial intelligence, life cycle.

---

**Симонова Лариса Анатольевна** – д-р техн. наук (Набережночелнинский институт (филиал) КФУ, Набережные Челны)  
E-mail: LASimonova@kpfu.ru

**Садыков Марат Фатихович** – аспирант (Набережночелнинский институт (филиал) КФУ, Набережные Челны)  
E-mail: Sadykov.MF@kamaz.ru



## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СПОСОБ НАПЫЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОИЗОЛИРУЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ НА ВНЕШНЮЮ СТЕНКУ ГИЛЬЗЫ ЦИЛИНДРОВ

А.К. Субаева, И.Р. Салахутдинов, А.А. Глущенко,  
С.В. Стрельцов, М.М. Замальдинов

Разработан технологический процесс нанесения на внешнюю поверхность электроизолирующего покрытия на основе политетрафторэтилена методом напыления.

**Ключевые слова:** электроизолирующее покрытие, гильза цилиндров, напыление, технологический способ, электродвижущая сила, фторопластовый слой, очистка, обезжиривание, нагрев.

Электродвижущая сила (эдс) отрицательно влияет на надежность двигателя внутреннего сгорания, поскольку она возникает из-за разницы потенциалов между разными металлами, в основном между алюминием и чугуном. Чтобы уменьшить влияние эдс, необходимо исключить из конструкции двигателя чугунную гильзу. В настоящее время моноблочные двигатели широко используются в автомобилях, однако они имеют существенный недостаток. В таких двигателях снижается возможность ремонта, так как при капитальном ремонте приходится растачивать сам блок цилиндров под ремонтный размер. При интенсивных условиях эксплуатации техники возникает потребность в быстром и экономичном ремонте двигателя внутреннего сгорания, чего моноблочный двигатель обеспечить не может. В связи с этим возникает необходимость разработки методов защиты цилиндро-поршневой группы от воздействия электрического тока.

В качестве альтернативного решения данной проблемы предлагается другой подход. Чтобы предотвратить разрушение гильзы цилиндров вследствие электрического пробоя, на ее внешнюю поверхность предполагается нанести электроизолирующее покрытие. Такой метод позволит увеличить срок службы двигателя [1].

Электроизоляционные покрытия должны характеризоваться высокими значениями электропрочности, удельного электрического сопротивления, теплопроводности, так как должен соблюдаться тепловой режим работы двигателя.

В качестве электроизолирующего покрытия можно использовать [2] защитный фторопластовый лак «ФТОРЭЛ» со следующими техническими характеристиками: электрическая прочность – 130 МВ/мм; диэлектрическая проницаемость (при  $f = 1$  МГц) – 1,96; тангенс угла диэлектрических потерь (при  $f = 1$  МГц) – 0,02; удельное объемное сопротивление – 1013 Ом·м; влагопроницаемость –  $1,7 \cdot 10^{-16}$  кг/м·с·Па.

Покрытия стойки к концентрированным щелочам и кислотам, углеводородам, могут эксплуатироваться в широком температурном интервале –80...120 °С (кратковременно – до 200 °С). Покрытия предназначены для защиты различных деталей из металла, пластика, дерева, силикатного стекла.

Политетрафторэтилен – полимер, получаемый в процессе полимеризации тетрафторэтилена. Продукт характеризуется уникальными химическими и антифрикционными свойствами, особым сочетанием электрических и физических свойств. Политетрафторэтилен негорюч, температура плавления – 327 °С; максимальная рабочая температура при эксплуатации – 260 °С; минимальная рабочая температура при эксплуатации – 269 °С; теплопроводность – 0,25 Вт/(м·К); удельная теплоемкость –  $1,04 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К); водопоглощение – 0 %; твердость по Бринеллю – 35 МПа; электрическая прочность на пробой – 25 кВ/мм; плотность – 2,2 г/см<sup>3</sup>.

Для определения необходимой толщины электроизолирующего покрытия воспользуемся результатами эксперимента на двигателе УМЗ-417 (рис. 1).

В проведенных опытах было выявлено, что максимальное значение эдс составляет  $\varepsilon = 0,5$  В (на осциллограмме указано 8 В, так как при опыте использовался усилитель сигнала).

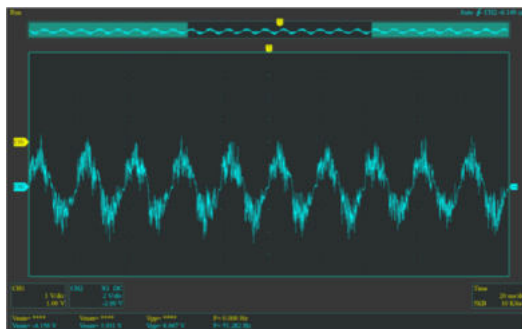


Рис. 1

Произведем расчет необходимой толщины слоя политетрафторэтилена, наносимого на поверхность гильзы двигателя:

$$\frac{E}{1} = \frac{\varepsilon}{x}, \quad (1)$$

где  $E$  – электрическая прочность на пробой фторопласта, кВ/мм;  $\varepsilon$  – величина эдс, найденная опытным путем;  $x$  – необходимый слой наносимого материала,  $x = 0,5 / 25000 = 0,00002$  мм.

Произведем расчеты в соответствии с толщиной стенки, площади изоляции:

$$U_{\text{раб max}} = 1,28 \cdot 0,5 = 0,64 \text{ В};$$

$$r = 10,4 \cdot 73200^{-\left(\frac{0,64-0,5}{0,00002 \cdot 25000}\right)} = 0,0225 \text{ мм}.$$

Максимальная толщина стенки  $r = 10,4$  мм; площадь внешней стенки гильзы цилиндра  $S = 73200$  мм<sup>2</sup>.

С учетом того что минимальная толщина покрытия, наносимого с помощью пульверизатора, составляет 0,015 мм, предлагается выполнить двухслойное нанесение электроизолирующего материала, обеспечивая общую толщину покрытия 0,03 мм (рис. 2) [3].

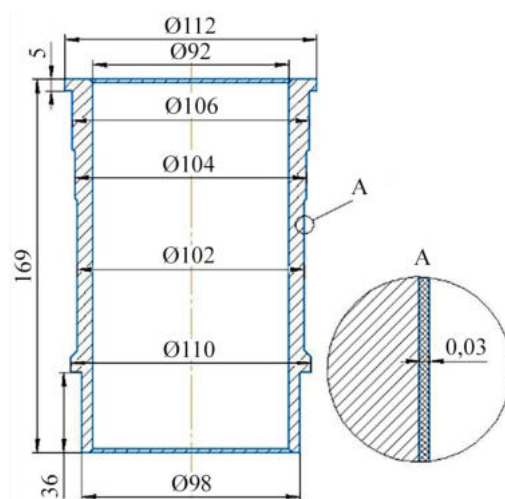


Рис. 2

Температурные напряжения, град, в гильзе

$$\Sigma t = \frac{E \alpha_{\text{ц}} \Delta t}{2(1-\mu)}, \quad (2)$$

где  $\Delta t = 110$  °C – температурный перепад между внутренней и наружной поверхностями гильзы, К;  $E = 1 \cdot 10^5$  МПа;  $\alpha_{\text{ц}} = 11 \cdot 10^{-6}$  1/К;  $\mu = 0,24$  – коэффициент Пуассона для чугуна;  $\Sigma t = 1 \cdot 10^5 \cdot 11 \cdot 10^{-6} \times 110 / (2(1-0,24)) = 79,6$  МПа.

Суммарные напряжения в гильзе цилиндра от действия давления газов и перепадов температур на наружной поверхности:

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_p + \Sigma t, \quad (3)$$

где  $\sigma_p = 47,3$  МПа – напряжение растяжения от действия максимального давления;

$$\sigma_{\Sigma} = 47,3 + 79,6 = 126,9 \text{ МПа}.$$

Поток теплоты, проходящий через диэлектрический слой, определяется следующим образом:

$$Q_T = UA(t_i - t_e) = A(t_i - t_e)/R, \quad (4)$$

где  $A$  – площадь поверхности диэлектрического материала,  $\text{м}^2$ ;  $U$  – коэффициент теплопередачи диэлектрического материала,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $R = 1/U$  – сопротивление теплопередаче диэлектрического материала,  $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$ ;  $t_i$  – температура воздуха внутренней стенки гильзы,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_e$  – температура наружной стенки гильзы.

На основе проведенного теоретического обоснования предлагается технологический процесс нанесения фторопласта на внешнюю цилиндрическую поверхность гильзы цилиндра. Данный процесс может быть реализован на предприятиях с различным уровнем материально-технического обеспечения и при наличии простейшего технологического оборудования.

Предлагаемый технологический процесс нанесения электроизолирующего покрытия на поверхность гильзы цилиндров включает следующие этапы: очистка гильз, проведение дефектации, изоляция внутренней полости гильзы, обезжиривание наружной поверхности, нанесение покрытия методом напыления и его последующий нагрев [4, 5].

Очистку гильз от накипи и следов коррозии наиболее эффективно осуществлять металлическим песком в специальной установке. В качестве очищающей среды используют косточковую или пластмассовую крошку, стеклянные шарики и гранулы сухого льда. Косточковая крошка (дробленая скорлупа фруктовых косточек) подается потоком сжатого воздуха, движущегося с высокой скоростью, на поверхность с нагаром под давлением  $0,3 \dots 0,6$  МПа. Частицы, с силой ударяясь о поверхность детали, разрушают и удаляют нагар и другие загрязнения, при этом не нарушая шероховатости поверхности детали. Очистка поверхностей деталей косточковой крошкой выполнялась пескоструйной установкой BLASTCOR BM-200 RC. Перед обработкой косточковой крошкой с поверхности с нагаром должны быть удалены масляные загрязнения.

Во избежание попадания частиц покрываемого материала необходимо изолировать внутреннюю полость гильзы. Так как площадь изоляции невелика, для простоты используется малярный скотч.

После пескоструйной обработки на поверхности детали могут сохраняться жировые загрязнения, которые необходимо удалить обезжириванием. Для нанесения растворителя используется салфетка. Вторая салфетка понадобится для удаления растворителя после его применения. Обе салфетки должны быть безворсовыми, в противном случае поверхность будет покрыта ворсинками, которые удалить будет сложно. После окончания работы нельзя прикасаться к обработанной поверхности пальцами, а также посторонними предметами.

Качество выполненной работы проверяется при помощи чистого листа бумаги: на ней будут видны посторонние вещества, если они остались. При помощи капли воды также легко проверить наличие жировых частиц: вода должна легко растекаться, не собираясь в шарик.

Нанесение электроизолирующего покрытия осуществляется распылением из баллона под давлением. Для поддержания политетрафторэтилена в жидком состоянии и качественного его нанесения на поверхность используется смесь из следующих веществ: диметиловый эфир – 30 %; смесь органических растворителей – 30 %; политетрафторэтилен – 15 %; органическое связующее вещество – 15%; функциональные добавки – 5 %. Материал необходимо распылять в вентилируемом помещении и с использованием средств индивидуальной защиты.

Перед нанесением необходимо встряхнуть баллон в течение 3 мин для образования равномерной смеси, которую необходимо распылять на подготовленную поверхность на расстоянии 20–30 см от поверхности детали. Распыление должно проводиться при температуре 20 °С. После нанесения первого слоя (15 мкм) поверхность должна подсохнуть 10 мин. После нанесения второго слоя деталь оставляют до полного высыхания. В конечном результате поверхность гильзы принимает равномерный серый матовый оттенок.

После нанесения фторопластового покрытия для повышения прочности слоя и снижения его шероховатости требуется термическая обработка [6]. Для этого использовались токарный станок 1К62 и тепловой пистолет Bosch мощностью 2300 Вт. Гильза цилиндра фиксируется в шпинделе токарного станка, а тепловой пистолет настраивается на температуру 500 °С. В процессе вращения шпинделя изолирующий слой равномерно прогревается, что обеспечивает качественное закрепление покрытия.

Нанесение фторопластового покрытия осуществлялось в соответствии с параметрами, полученными на основе теоретических расчетов. Предлагаемый технологический процесс отличается от существующих методов простотой, доступностью и применением недорогого и несложного оборудования. Благодаря этому он является экономически целесообразным и рекомендуется для внедрения на ремонтных предприятиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Починов В.Д., Салахутдинов И.Р. Повышение износостойкости гильз цилиндров путем нанесения электроизолирующего покрытия // Научно-технологические приоритеты в развитии агропромышленного комплекса России: Материалы 73-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Рязань, 21 апр. 2022. Рязань: РГАТУ, 2022. Ч. 2. С. 120–124.
2. Рахматуллина Р.Г., Гарайшин А.И., Маскова А.Р. Экспериментальное определение показателя теплообмена – теплопроводности – для фторсодержащих полимеров // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2022. № 1. С. 27–30.
3. Салахутдинов И.Р., Глуценко А.А., Хохлов А.Л. Теоретическое обоснование снижения интенсивности кавитационного изнашивания стенок гильзы цилиндров нанесением антикавитационного покрытия // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 2 (58). С. 18–24.
4. Салахутдинов И.Р. и др. Конструктивный вариант исполнения электроизолирующего покрытия политетрафторэтиленом на поверхности гильзы цилиндров // Наука в современных условиях: от идеи до внедрения: Материалы нац. науч.-практ. конф., г. Ульяновск, 15 дек. 2022. Ульяновск: УлГАУ, 2022. С. 952–960.
5. Салахутдинов И.Р. и др. Технологический процесс нанесения антикавитационного покрытия на стенки гильз цилиндров // Наука в современных условиях: от идеи до внедрения: Материалы нац. науч.-практ. конф., г. Ульяновск, 15 дек. 2022. Ульяновск: УлГАУ, 2022. С. 961–968.
6. Федяев В.Л. и др. Многофакторная параметризация адгезионной прочности полимерных порошковых покрытий // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. № 3. С. 63–69.

Поступила в редколлегию 21.05.25

## TECHNOLOGICAL METHOD OF SPRAYING AN ELECTROINSULATING COATING ON THE OUTER WALL OF A CYLINDER LINER

A.K. Subaeva, I.R. Salakhutdinov, A.A. Glushchenko,  
S.V. Strel'tsov, and M.M. Zamal'dinov

The work is devoted to the development of a technological process for applying an electrically insulating coating based on polytetrafluoroethylene to the external surface by spraying.

**Keywords:** electrically insulating coating, cylinder liner, spraying, technological method, electromotive force, fluoroplastic layer, cleaning, degreasing, heating.

**Субаева Асия Камилевна** – д-р экон. наук (Чистопольский филиал КНИТУ-КАИ, Чистополь)

E-mail: subaeva.ak@mail.ru

**Салахутдинов Ильмас Рифкатович** – канд. техн. наук (Ульяновский ГАУ, Ульяновск)

E-mail: ilmas.73@mail.ru

**Глущенко Андрей Анатольевич** – канд. техн. наук (Ульяновский ГУ, Ульяновск)

E-mail: oildel@yandex.ru

**Стрельцов Сергей Викторович** – канд. техн. наук (Ульяновский ГАУ, Ульяновск)

E-mail: ssv314@mail.ru

**Замальдинов Марат Миндехатович** – канд. техн. наук (Ульяновский ГАУ, Ульяновск)

E-mail: zamaldinov.marat@mail.ru

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗАПАСАМИ, МИНИМИЗАЦИЯ ИЗДЕРЖЕК ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СКЛАДОВ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В.Л. Федяев, А.В. Беляев, Р.В. Федяев

Рассмотрены вопросы оптимального управления запасами комплектующих, материалов, сырья, а также минимизации издержек при работе складов машиностроительных предприятий. С использованием методов математического моделирования, теории производственной оптимизации, имеющихся в научно-технической литературе сведений сформулированы оптимизационные задачи по управлению запасами, определению максимальной выгодности эксплуатации складских систем предприятий. В качестве варьируемых параметров в первой задаче выбран размер (объем) партии поставок при пополнении запасов, во второй – пропускная способность складов. В результате решения указанных задач установлено, что эффективность управления запасами повышается, если уменьшаются издержки на их пополнение, повышается закупочная цена приобретаемых комплектующих, материальных ресурсов. Для увеличения выгодности работы складов следует повысить пропускную способность складской системы, уменьшить стоимость реализуемой продукции, товаров.

**Ключевые слова:** машиностроительные предприятия, управление запасами, складские системы, оптимизация их показателей.

Основными составляющими машиностроительного предприятия являются вспомогательные подразделения (предназначенные, в первую очередь, для обеспечения предприятия необходимыми материалами, энергетическими, кадровыми и другими ресурсами), само производство и подразделения по реализации продукции. Практически в каждой из указанных составляющих имеются структуры, службы, занимающиеся вопросами снабжения, формирования запасов, складирования, хранения, а также хранения запасов произведенной продукции, ее реализации.

В данной статье рассматриваются вопросы рационального управления запасами, хранения этих запасов на складах предприятия.

Различают следующие виды запасов [1–3]:

- 1) буферные запасы, которые организуются между поставщиком и потребителем с целью ослабления зависимости потребителя от поставщика;
- 2) запасы для компенсации задержек, связанных с транспортированием товаров, другими причинами;
- 3) запасы готовой продукции, предназначенные для обеспечения ожидаемого спроса, компенсации отклонений фактического спроса от прогнозируемого;
- 4) запасы, необходимые для удовлетворения ожидаемого (возможно, ажиотажного спроса);
- 5) гарантийный запасы, предназначенные для удовлетворения возможного, но непредсказуемого спроса.

Организация запасов сопровождается издержками, обусловленными затратами на оформление заказов, договоров поставок; затратами на транспортирование, складирование, хранение, получение комплектующих, материалов, сырья.

Один из возможных подходов рационального управления запасами, минимизации издержек при хранении, складировании заключается в применении методов математического моделирования [2, 4, 5], теории производственной оптимизации названных процессов. Математические модели соответствующих процессов представляют собой функциональные зависимости вида

$$Z = F(X, Y),$$

где  $X$ ,  $Y$  – величины (векторы), характеризующие внутренние и внешние факторы;  $Z$  – выходные показатели (векторы) процесса; векторная функция  $F$  считается известной.

Различают прямую и обратную задачу. При этом в первом случае при известных  $X$ ,  $Y$  необходимо найти  $Z$ ; во втором, зная  $Y$  и  $Z$ , требуется определить величину  $X$ .

Если функция  $F$  неизвестна, что часто случается, ее надо установить. Эта наиболее сложная задача называется задачей идентификации математической модели.

Назначение математической модели состоит в следующем:

- анализ исходного процесса, установление функциональных связей между его составляющими, оценка влияния внешних факторов;
- прогнозирование поведения процесса как с течением времени, так и при изменении внутренних, внешних факторов;
- определение рациональных, оптимальных вариантов организации, функционирования рассматриваемого процесса, при необходимости разработка предложений по повышению его показателей.

В наиболее общем виде теория оптимизации – совокупность математических зависимостей, математических моделей, аналитических и численных методов, ориентированных на отыскание и идентификацию наилучших вариантов из множества альтернативных [5–9]. При этом в рамках производственной оптимизации, имея в виду логистику, процессы снабжения, складирования, хранения, а также транспортирования, распределения и др., будем считать их оптимизируемыми процессами.

Выделим три основных этапа решения задач производственной оптимизации: постановка задачи (математическая формулировка), разработка методов ее интегрирования, анализ полученных результатов.

При реализации первого, главного этапа конкретизируются процессы, пределы изменения параметров; определяются критерии оптимальности (целевые функции); выбираются внутрисистемные параметры и переменные, пригодные для описания и идентификации показателей; разрабатываются математические модели, по возможности полно и адекватно отображающие исследуемые процессы.

Основная стадия решения задачи оптимизации – определение критерия оптимальности, величины, характеризующей эффективность процесса, отвечающей таким требованиям, как конкретность, ясный экономический смысл, возможность выражения числом. Различают простые и сложные критерии оптимальности. Простые критерии определяют экстремум одного показателя без каких-либо ограничений (безусловная оптимизация), сложные – при наличии некоторых ограничений (дополнительных условий).

Обычно критерием оптимальности запасов является условие минимума издержек, либо отдельных, наиболее значимых, либо их суммы. При этом управляющими параметрами, от которых зависят издержки, являются, в частности, размер (объем) заказа на пополнение запаса и время, необходимое для пополнения. Кроме того, принимается допущение, что в течение определенного временного интервала размер (объем) запаса фиксируется (не меняется) или меняется, например, в ожидании санкций, каких-либо других обстоятельств. При умеренных темпах изменения ситуации в качестве контрольного интервала времени выбирается, как правило, год, при ускоренных – квартал, авральные – месяц.

Следуя работе [2], рассмотрим математические модели для оценки годовых издержек хранения запасов, выполнения заказов на пополнение их в зависимости от размеров партии поставок (размеры запасов фиксированы). Ориентируясь на формулу Уилсона, запишем:

$$S_m = S_m(v) = S_k(v) + S_p(v). \quad (1)$$

Здесь:  $S_m$  – общие годовые издержки управления, руб.;  $S_k(v) = 0,5kvC_0$  – годовые издержки хранения запасов, руб.;  $S_p(v) = S_0Q/v$  – годовые издержки выполнения заказов по пополнению запасов, руб.;  $v(v \neq 0)$  – размер партии поставок пополнения запасов, ед.;  $C_0$  – закупочная цена единицы комплектующих, материалов, сырья, руб./ед.;  $S_0$  – издержки выполнения заказов, руб.;  $k$  – издержки хранения, выраженные как доля цены  $C_0$ ;  $Q$  – количество комплектующих, материальных ресурсов, использованных предприятием за год, ед.

Из формулы (1) видно, что годовые издержки хранения запасов  $S_k$  в зависимости от размеров партии поставок  $v$  меняются линейно, однако годовые издержки выполнения заказов  $S_p$ , наоборот, меняются нелинейно, убывая с увеличением  $v$ . Используя функцию  $S_m = S_m(\bar{v})$  в качестве критерия безусловной оптимальности, приравняв производную  $S'_m(\bar{v})$  нулю, из уравнения

$$0,5(kC_0 - S_0Q/\bar{v}^2) = 0,$$

где  $\bar{v} = v/v_0$  – безразмерная величина параметра  $v$  ( $v_0$  – характерное значение  $v$ , например, среднее нормативное за год), найдем безразмерный оптимальный размер партии поставок

$$\bar{v}^* = \left(2S_0Q/(kv_0^2C_0)\right)^{1/2}.$$

Отсюда общие годовые издержки управления, определяемые как сумма годовых издержек хранения запасов и выполнения заказов, достигают минимальных значений

$$S_{\min} = 0,5kC_0v^* + S_0Q/v^* = kv^*C_0 \approx 1,41(S_0Q)^{1/2}/(kC_0)^{3/2} \quad (2)$$

при оптимальных размерах партии поставок пополнения запасов, ед.:

$$v^* = v_0\bar{v}^* = (2S_0Q/kC_0)^{1/2}. \quad (3)$$

Располагая формулами (2), (3), нетрудно убедиться, что величину  $S_{\min}$  можно уменьшить (т. е. сократить годовые издержки), если уменьшить издержки выполнения заказов на пополнение комплектующих, материальных ресурсов  $S_0$  или увеличить закупочную цену единицы приобретаемых комплектующих, материальных ресурсов (чем они дороже, тем меньше годовые издержки управления запасами).

Рассмотрим следующую оптимизационную задачу – минимизацию издержек при эксплуатации складов машиностроительных предприятий. Складские системы предприятий способствуют сохранению качества продукции, комплектующих, материалов, сырья (товаров); повышению ритмичности и организованности производства, работы транспорта; снижению простоев транспортных средств и транспортных расходов.

Кроме операций складирования в рамках складских систем выполняются внутрискладские транспортные, погрузочные, разгрузочные, сортировочные, комплектовочные и промежуточные перегрузочные операции, а также некоторые технологические операции. В связи с этим складские системы следует рассматривать как транспортные складские комплексы, в которых процессы перемещения грузов играют важную роль. Ввиду неравномерности перевозок грузов работа этих комплексов может иметь динамический или стохастический (вероятностный) характер.

В простейшем случае складская система состоит из одного пункта хранения и одного источника снабжения товаров (рисунки).



На практике целесообразно для анализа складских систем использовать эту схему. Важным показателем ее работы являются издержки (убытки), основные – связанные с поставкой запасов, содержанием запасов, выполнением заказов, обусловленные дефицитом запасов, когда поступающие требования не могут быть удовлетворены.

Вместе с тем минимизация издержек означает повышение, в частности, таких показателей складов, как производительность, прибыль.



Целью работы любого склада предприятия является повышение этих показателей. Если рассматривать их в комплексе, то целесообразно введение одного показателя – выгодности  $W$  [2]. Его можно оценить с помощью формулы

$$W = \alpha E + (1 - \alpha)P,$$

где  $\alpha$  – коэффициент выгодности ( $0 < \alpha < 1$ ), задаваемый экспертно;  $E$  – пропускная способность склада (величина, руб., характеризующая количество товаров, которые могут пройти через склад в единицу времени);  $P$  – прибыль склада в единицу времени.

Если  $R = R(E)$  – стоимость реализованной продукции (товара), руб./год;  $\beta = \beta(E)$  – коэффициент спроса, то прибыль склада в год

$$P = \beta(E)E - R(E).$$

Отсюда выгодность работы склада

$$W = W(E) = (\alpha + (1 - \alpha)\beta(E))E - (1 - \alpha)R(E)$$

будет максимальной, когда

$$dW/dE = \alpha + (1 - \alpha)(\beta(E) + E\beta'(E)) - (1 - \alpha)R'(E) = 0,$$

где производные  $\beta'(E) = d\beta(E)/dE$ ,  $R'(E) = dR(E)/dE$ .

Исходя из опыта работы конкретного склада, предположим, что коэффициент спроса

$$\beta = \beta(E) = \beta_0 + \beta_1 E, \quad (4)$$

т. е. зависит от пропускной способности склада  $E$  линейно. Стоимость реализованной продукции в год  $R(E)$ , очевидно, будет

$$R = R(E) = c_0 + c_1 E + c_2 E^2. \quad (5)$$

В формулах (4), (5)  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  – эмпирические коэффициенты, определяемые для каждого склада предприятия по результатам анализа средних показателей его работы в течение определенного периода. Со временем они могут меняться. Возможно также их прогностическое задание.

При этом коэффициент  $\beta_0 \neq 0$ ,  $\beta_1$  может равняться нулю. Коэффициент  $c_0 \neq 0$ , поскольку предполагается, что даже при малой пропускной способности склада ( $E \ll 0$ ) реализация продукции производится. Коэффициенты  $\beta_1$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  характеризуют влияние на коэффициент спроса  $\beta$ , стоимость реализованной продукции (товара)  $R$  увеличения (уменьшения) пропускной способности склада  $E$ . Необходимо также иметь в виду, что все коэффициенты ( $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ) зависят от цены товара.

Таким образом,

$$dW/dE = a_0 + a_1 E. \quad (6)$$

Здесь коэффициенты  $a_0 = \alpha + (1 - \alpha)(\beta_0 - c_1)$ ,  $a_1 = 2(1 - \alpha)(\beta_1 - c_2)$  обусловлены величиной коэффициента выгодности  $\alpha$ , а также коэффициентов  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ , характеризующих спрос на реализуемый товар.

Из формулы (6) следует, что показатель выгодности  $W^*$  достигает максимума при оптимальном значении пропускной способности склада:

$$E^* = -a_0/a_1 = 0,5(\bar{\alpha} + \beta_0 - c_1)/(c_2 - \beta_1), \quad (7)$$

где  $\bar{\alpha} = \alpha/(1 - \alpha)$ ; размерность коэффициентов  $\beta_1$ ,  $c_2$  – руб./год; величины  $\alpha$ ,  $\bar{\alpha}$ ,  $\beta_0$ ,  $c_1$  безразмерные.

Отсюда максимальная выгодность работы склада предприятия

$$W^* = W^*(E^*) = b_0 + b_1 E^* + b_2 (E^*)^2, \quad (8)$$

где  $b_0 = -(1-\alpha)c_0$ ;  $b_1 = \alpha + (1-\alpha)(\beta_0 - c_1)$ ;  $b_2 = (1-\alpha)(\beta_1 - c_2)$ .

Из соотношения (8) видно, что величина  $W^*$  будет тем больше, чем больше оптимальное значение пропускной способности склада (7), меньше коэффициент  $b_0$ ; больше коэффициенты  $b_1$  и  $b_2$ , в первую очередь, за счет увеличения  $\beta_0$ , характеризующего спрос, а также меньше коэффициенты  $c_1$ ,  $c_2$ . Обобщив, получаем, что для увеличения работы склада предприятия необходимо, во-первых, увеличить пропускную способность склада, спрос на реализуемую продукцию, во-вторых, уменьшить ее стоимость.

Эти выводы в целом согласуются с имеющимися представлениями. Более того, полученные решения оптимизационных задач применимы на предприятиях других отраслей промышленности, а также торговли.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимова Е.Г. Экономика. М.: Флинта, 2008. 390 с.
2. Неруш Ю.М. Логистика. М.: Юнити-Дана, 2004. 195 с.
3. Очаковская М.С., Рыбалко М.А. Маркетинг: новые тенденции и перспективы. М.: Проспект, 2024. 176 с.
4. Красс М.С. Математика в экономике: математические методы и модели. М.: Юрайт, 2025. 541 с.
5. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике. М.: МГТУ, 2003. 496 с.
6. Понтрягин Л.С. и др. Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука, 1976. 392 с.
7. Ахмадиев Ф.Г. и др. Математическое моделирование. Методы оптимизации. Вычислительный эксперимент. Казань: Изд-во АН РТ, 2021. 492 с.
8. Федяев В.Л., Галимов Э.Р., Беляев А.В. Математическое моделирование процессов термической обработки рабочих поверхностей деталей и изделий. Казань: Изд-во АН РТ, 2019. 240 с.
9. Осипов П.П. Методы оптимизации с примерами решения задач. Казань: Изд-во АН РТ, 2024. 276 с.

Поступила в редколлегию 28.05.25

## OPTIMAL INVENTORY MANAGEMENT, COST MINIMIZATION IN OPERATION OF WAREHOUSES OF ENGINEERING ENTERPRISES

V.L. Fedyaev, A.V. Belyaev, and R.V. Fedyaev

The article considers the issues of optimal management of stocks of components, materials, raw materials, as well as minimization of costs in the operation of warehouses of engineering enterprises. Using the methods of mathematical modeling, the theory of production optimization, information available in the scientific and technical literature, optimization problems for inventory management, determining the maximum profitability of operating warehouse systems of enterprises are formulated. In the first problem, the size (volume) of the delivery lot during stock replenishment is selected as variable parameters; in the second - the throughput of warehouses. As a result of solving these problems, it is shown that the efficiency of inventory management increases if the costs of their replenishment decrease, the purchase price of the purchased components and material resources increases. To increase the profitability of warehouse operations, it is necessary to increase the throughput capacity of the warehouse system and reduce the cost of sold products and goods.

**Keywords:** mechanical engineering enterprises, inventory management, warehouse systems, optimization of their indicators.

---

**Федяев Владимир Леонидович** – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)  
E-mail: vlfed2020@gmail.com

**Беляев Алексей Витальевич** – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: alexey-beljaev@mail.ru

**Федяев Родион Владимирович** – студент (РАНХиГС, Москва)

E-mail: fedyaevrodion2003@gmail.com

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ТЕХНОЛОГИЮ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ ВОЛОКОННЫМИ ЛАЗЕРАМИ

А.В. Шапарев, И.А. Савин

Исследовано влияние легирующих элементов в металлах, конструкции и расположения сопла для подачи режущего газа, состояния поверхности металла, настройки фокусирующего объектива на процесс лазерной резки металла. Установлено, что при лазерной резке нержавеющей стали легирующие элементы увеличивают вязкость жидкой фазы, что приводит к образованию закаленного грата на выходе реза, повышению его высоты и ухудшению качества боковой поверхности. Исследовано влияние на эффективность и качество процесса лазерной резки таких факторов, как состояние поверхности обрабатываемого металла, шероховатость поверхности, наличие царапин и вторичной окалины различной толщины, однородность структуры металла. Установлено значение высоты расположения сопла в диапазоне 0,5...0,7 мм, что позволяет минимизировать потери режущего газа в проходящем потоке и повысить эффективность лазерной резки. Показано, что необходимо выбирать фокусирующий объектив в зависимости от толщины и марки сталей, что позволяет получить оптимальные параметры процесса лазерной резки и высокое качество реза.

**Ключевые слова:** лазерная резка, конструкция сопла, фокусирующий объектив, вязкость жидкой фазы, состояние поверхности.

При проектировании технологических процессов лазерной резки возникают дополнительные факторы, которые не рассматриваются в действующих ГОСТах и инструкциях и могут влиять на качество и скорость резки. К таким факторам относятся наличие легирующих элементов и специальных присадок в обрабатываемом металле, состояние поверхности обрабатываемого металла, снижение качества боковой поверхности реза на участках разгона и торможения, перегрев и прогорание металла при обработке угловых зон контура реза.

Данные факторы устраняются различными способами. Например, невозможно повлиять на наличие легирующих элементов в металле, но можно опытным путем подобрать необходимые технологические режимы для лазерной резки. Появление этого фактора неизбежно, и требуется тщательный анализ экспериментальных данных, а при разработке методов – минимизация его негативного воздействия.

С целью обеспечения требуемого качества поверхности обрабатываемого металла необходимо ввести дополнительную технологическую операцию по очистке поверхности. В случае если данное состояние поверхности металла не обусловлено технологическими условиями производства, необходимо провести тщательную очистку поверхности для достижения оптимальных условий обработки.

Перегрев и прогорание металла при обработке угловых зон контура реза обычно происходит при резке металла толщиной 2–10 мм, поэтому зону реза необходимо дополнительно охлаждать при помощи специальных сопел. Необходимость охлаждения возрастает с увеличением толщины металла при резке.

На качество резки негативно влияет ухудшение качества боковой поверхности реза на участках разгона и торможения, что проявляется в начале и конце контура реза, где может наблюдаться значительное и непредсказуемое изменение качества поверхности. В меньшей степени данное явление выражено на участках торможения.

При обработке угловых зон контура реза, особенно остроугольных, существует риск недопустимого перегрева или даже прогорания металла в вершине угла. Это связано с тем, что в данной области происходит концентрация теплового воздействия, что может привести к структурным изменениям материала и ухудшению его эксплуатационных характеристик.

Рассмотрим методы предотвращения негативных последствий, связанных с указанными факторами.

Лазерное резание широко применяется для обработки конструкционных и нержавеющей сталей, различных марок алюминиевых сплавов. В процессе производства этих материалов вводятся легирую-

щие элементы (углерод, марганец, кремний, хром), повышающие коррозионную стойкость стали, делая ее более устойчивой к окислению и образованию пассивной пленки на поверхности. Никель увеличивает прочность и упрочняемость стали, повышает ее устойчивость к низким температурам и обеспечивает хорошую ударную вязкость. Молибден улучшает прочность и жаропрочность стали, повышает ее устойчивость к деформации при высоких температурах. Ванадий повышает твердость и прочность стали, улучшает ее устойчивость к износу и упрочняемость при нагреве.

При лазерной резке конструкционных сталей данные элементы увеличивают вязкость жидкой фазы, что приводит к образованию закаленного грата на выходе реза, повышению его высоты и ухудшению качества боковой поверхности. Аналогичные эффекты наблюдаются и при лазерной обработке нержавеющей сталей с повышенным содержанием присадок. В алюминиевых сплавах углерод отсутствует, однако марганец и кремний также присутствуют, что также способствует увеличению вязкости расплава.

Для достижения оптимальных параметров лазерного реза конструкционной стали в среде кислорода необходимо регулировать давление режущего газа. В зависимости от толщины материала, однородности его структуры, содержания примесей и мощности лазера давление кислорода должно находиться в диапазоне 0,075...0,3 МПа. При резании нержавеющей сталей в среде нейтрального газа для удаления жидкой фазы из области реза и предотвращения образования грата давление нейтрального газа должно составлять 0,55...2,0 МПа в зависимости от толщины металла.

Различие значений давления кислорода и нейтрального газа обусловлено сгоранием расплава при резке конструкционной стали с использованием кислорода в качестве режущего газа при оптимально подобранных параметрах, что позволяет избежать образования грата и улучшить качество реза. В случае обработки нержавеющей сталей и алюминиевых сплавов использование нейтрального газа при указанных давлениях способствует эффективному удалению расплава с поверхности реза, что также положительно влияет на качество конечного продукта.

Таким образом, для достижения оптимальных результатов при лазерном резании следует учитывать химический состав обрабатываемого материала, его структуру и параметры условия проведения процесса. Комплексный подход к выбору параметров резки позволит обеспечить высокое качество и производительность процесса.

Величина давления режущего газа зависит от требований, предъявляемых к качеству реза, – минимизации высоты грата на выходе реза или, чаще всего, его полного отсутствия. Например, для конструкционных сталей толщиной 2...10 мм давление режущего газа должно быть не менее 2,0 МПа. При резании металла толщиной менее 2 мм не удастся полностью избавиться от грата.

Из исследований вязкости расплава при резке нержавеющей сталей установлено, что наибольшее количество расплава формируется в нижней зоне реза, где металл нагревается до температуры плавления 1539 °С. Углерод с температурой плавления 3650 °С и кипения 4350 °С сохраняется в расплаве в неизменном состоянии, т. е. присутствует в виде твердых взвешенных частиц. Предполагается, что именно этим обусловлено повышение вязкости жидкой фазы [1].

Экспериментально установлено, что повышенная вязкость расплава нержавеющей сталей обусловлена значительным содержанием хрома и наличием присадок углерода, марганца и кремния, в то время как вязкость расплавов алюминиевых сплавов определяется только присадками марганца и кремния. Кроме того, мелкодисперсные твердые частицы карбида кремния в виде твердых включений в жидком металле существенно повышают его вязкость [2]. Марганец при нагревании активно взаимодействует с кислородом, образуя оксиды различной валентности, которые являются мелкодисперсными твердыми частицами и повышают вязкость расплава при лазерной резке.

Повышенное содержание углерода в инструментальных сталях затрудняет их лазерную резку. В связи с этим для резки инструментальных сталей требуется импульсный лазер на алюмоиттриевом гранате, позволяющий увеличить показатели резки в несколько раз по сравнению с волоконным лазером мощностью 3 кВт [3]. Состояние поверхности обрабатываемого металла является критическим фактором, влияющим на эффективность и качество процесса резки.

К основным параметрам, подлежащим анализу, относятся шероховатость поверхности, наличие царапин и вторичной окалины различной толщины, а также однородность структуры металла, которая зависит от условий его производства. Кроме того, на поверхности часто присутствуют следы коррозии, загрязнения, остатки смазочных материалов и лакокрасочных покрытий, что негативно влияет на предельную глубину резания, его скорость и стабильность. В связи с этим перед началом резки необходимо маршрутную карту дополнить технологической операцией для проведения тщательной очистки поверхности металла.

Однако простое увеличение давления режущего газа и очистка поверхности без учета параметров расположения сопла и его проходного диаметра не всегда приводят к ожидаемому улучшению показателей резания. Для достижения оптимальных результатов необходимо учитывать комплексный подход, включающий детальный анализ контура резки, параметров газовой струи и характеристик обрабатываемого материала. Только при соблюдении этих условий можно обеспечить высокую производительность и качество резки, уменьшая при этом влияние негативных факторов, связанных с состоянием поверхности металла.

Для обеспечения максимальной эффективности и минимизации негативных последствий необходимо тщательно осуществлять выбор конструкции и оптимального расположения сопла в зависимости от специфики обрабатываемого материала и условий лазерной резки.

При проведении резки с использованием высокого давления нейтрального газа или сжатого воздуха ключевую роль играет высота расположения сопла относительно поверхности металла. Согласно рекомендациям оптимальным является значение высоты в диапазоне 0,5...0,7 мм, что позволяет минимизировать потери газа в проходящем потоке и повысить эффективность резки.

В случае резки конструкционной стали в среде кислорода необходимо учитывать зависимость давления газа от толщины обрабатываемого металла. Давление кислорода должно варьироваться в диапазоне 0,07...0,29 МПа в зависимости от толщины материала. Сопло над поверхностью металла должно быть расположено на расстоянии более 1 мм для предотвращения возникновения ударной волны, возникающей при сверхзвуковом истечении кислорода из сопла при давлении более 0,19 МПа. Это явление приводит к изменению параметров резания и требует увеличения зазора между соплом и поверхностью металла для обеспечения оптимального проникновения кислорода в зону реза. Комплексный подход к выбору конструкции и оптимального положения сопла позволяет значительно повысить качество и эффективность обработки различных типов металлов.

Для лазерной резки металлов применяются сопла с одним проходным отверстием диаметрами от 1...3,5 мм. Для резки металлических листов толщиной более 6 мм используется сопло с увеличенным диаметром проходного отверстия, что обусловлено необходимостью обеспечения более эффективного охлаждения зоны реза. Экспериментальные исследования демонстрируют, что использование сопла с увеличенным диаметром способствует более эффективному охлаждению металла в области, прилегающей к фронту реза. Это приводит к снижению уровня термических деформаций, минимизации потерь излучения и режущего газа (в данном случае кислорода) при их прохождении через зону реза, а также к повышению эффективности удаления жидкой фазы с поверхности реза.

Для резки конструкционной стали толщиной более 12 мм рекомендуется применять сопло с дополнительными отверстиями, расположенными на определенном расстоянии. Через дополнительные отверстия проходит режущий газ (кислород), охлаждающий зону реза с целью уменьшения термических деформаций, повышения качества обработки и обеспечения ее стабильности. Для охлаждения зоны резки и удаления грата возможно дополнительное охлаждение зоны резки (см. рисунок). Поток газа снижает деформации и предотвращает глубокое приваривание грата.

При использовании азота технологический процесс лазерной резки требует применения специализированных сопел с увеличенным диаметром проходного канала и оптимизированным давлением вспомогательного газа. Анализ данных (табл. 1) позволяет установить корреляцию между оптимальными параметрами проходного сопла и толщиной обрабатываемого материала.

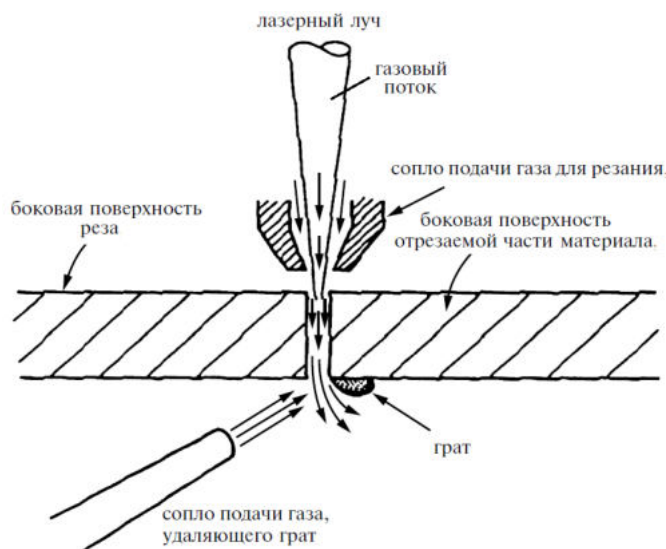


Таблица 1

Толщина листа, мм	Диаметр сопла, мм
1...3	1,7
1...4	2,5
4...6	2,5; 3,0
7...8	2,5; 3,0
9...10	3,0; 3,5; 4,0
11...12	3,5; 4,0
13...14	4,0; 5,0

Размеры проходного диаметра сопла многократно превышают ширину реза на его входе. Это означает, что в рез проходит меньшая часть потока режущего газа. Оставшаяся часть режущего газа разделяется на два потока. Один из них вытекает в боковые стороны зазора между соплом и поверхностью металла, другой попадает на поверхность металла и охлаждает его.

Для достижения оптимальных параметров процесса резания необходимо выбрать фокусирующий объектив для лазерного излучения. Современные установки для лазерной резки листовых металлов обычно оснащаются тремя основными типами объективов с различными фокусными расстояниями:  $f = 127$  мм,  $f = 190$  мм,  $f = 254$  мм. Эти параметры позволяют адаптировать процесс резки к различным требованиям и условиям эксплуатации (табл. 2).

Таблица 2

Толщина листа, мм	Фокусное расстояние объектива, мм
1,0...2,0	127
3,0	127; 190
4,0...10,0	190
12,0...14,0	254

Объектив с фокусным расстоянием  $f = 127$  мм предпочтительно использовать для высокоскоростной резки металлов толщиной до 3 мм. Данный выбор обусловлен его способностью обеспечить высокую производительность и качество реза при работе с тонкими материалами. Тщательный выбор фокусирующего объектива является ключевым фактором для достижения максимальной эффективности и точности процесса лазерной резки.

При обработке изделий из различных сталей толщиной менее 3 мм необходимо избегать формирования грата на выходе реза. Для достижения этого результата в зависимости от конкретной толщины материала и мощности лазерного излучения рекомендуется использовать скорости резания 10 м/мин и выше. В процессе абляции, который преобладает в данном диапазоне параметров, происходит значительное испарение материала, что обеспечивает эффективное удаление жидкой фазы и минимизацию образования грата.

При резке толстых металлических листов абляция, формирующая фронт реза, развивается на поверхности материала при усредненной плотности мощности, не превышающей  $W = 6 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Эта величина лишь в три раза превышает порог испарения конструкционной стали. Несмотря на это, абляции достаточно для эффективного резания благодаря специфическим механизмам теплопередачи и испарения.

Для повышения доли испарения в составе абляции и предотвращения образования грата или уменьшения его высоты необходимо увеличить плотность мощности  $W$ . С этой целью при резке металлов толщиной до 3 мм включительно используется объектив с фокусным расстоянием  $f = 127$  мм. При оптимальном сочетании фокусных расстояний объектива и коллиматора лазера размер светового пятна на поверхности металла может быть уменьшен до  $d_1 \approx 100 \div 120$  мкм. В случае использования лазера мощностью 1,5 кВт усредненная плотность мощности увеличивается до  $W = 1,95 \cdot 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>. Для достижения такого размера светового пятна рекомендуется перемещать объектив над поверхностью материала, начиная от перетяжки каустики и поднимаясь выше с шагом 0,3...0,5 мм [4].

При использовании волоконного лазера мощностью 0,7 кВт с объективом  $f = 150$  мм и расположении поверхности конструкционной стали толщиной 1,2 мм на 0,5 мм ниже перетяжки каустики высота грата на выходе реза не превышала 20 мкм.

Фирмой Linde Group рекомендуется резать нержавеющую сталь толщиной 4...6 мм в среде азота с использованием волоконного лазера мощностью 3 кВт [5]. Считается оптимальным использование объектива с фокусным расстоянием  $f = 190,5$  мм при таких параметрах. Результаты резки нержавеющей стали толщиной 3...5 мм с использованием волоконного лазера мощностью 2 кВт и объектива  $f = 145$  мм продемонстрировали значительное превосходство по показателям скорости и качества в сравнении с результатами, полученными при использовании объектива  $f = 200$  мм. Этот пример демонстрирует, что для выбора оптимального объектива необходимо учитывать не только его фокусное расстояние, но и другие параметры – мощность лазера и условия проведения резания.

Таким образом, для качественного резания нержавеющей стали толщиной 12...14 мм требуется использование лазера мощностью, превышающей 3 кВт. Анализ показал, что для глубокого резания наиболее подходящим является объектив с фокусным расстоянием  $f = 250 \div 300$  мм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вакс Е.Д., Сапрыкин Л.Г., Миленский М.Н. Резание металлов излучением мощных волоконных лазеров. М.: Техносфера, 2016. 352 с.
2. Вакс Е.Д., Миленский М.Н., Сапрыкин Л.Г. Практика прецизионной лазерной обработки. М.: Техносфера, 2013. 696 с.
3. Виноградов Б.А., Харичева Д.Л., Месяриков Г.П. Действие лазерного излучения на керамические материалы. СПб.: Наука, 2009. 202 с.
4. Григорьянц А.Г., Соколов А.А. Лазерная резка металлов. М.: Высшая школа, 1988. 127 с.
5. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. 141 с.

Поступила в редколлегию 20.06.25

## ANALYSIS OF THE IMPACT OF VARIOUS FACTORS ON LASER CUTTING TECHNOLOGY WITH FIBER LASERS

A.V. Shaparev and I.A. Savin

The influence of alloying elements in metals, the design and location of the nozzle for cutting gas supply, the condition of the metal surface, the setting of the focusing lens on the process of laser cutting of metal has been investigated. It has been established that during laser cutting of stainless steels, alloying elements increase the viscosity of the liquid phase, which leads to the formation of hardened spatter at the cut exit, increasing its height and worsening the quality



of the side surface. The influence of such factors on the efficiency and quality of the laser cutting process, as the condition of the surface of the processed metal, surface roughness, the presence of scratches and secondary scale of various thicknesses, the uniformity of the metal structure, is an important factor. The value of the nozzle height is set in the range of 0.5 to 0.7 mm, which allows to minimize the loss of cutting gas in the passing flow and allows to increase the efficiency of laser cutting. It is shown that it is necessary to choose a focusing lens depending on the thickness and grade of steel, which allows to obtain the optimal parameters of the laser cutting process and high-quality cut.

**Keywords:** laser cutting, nozzle design, focusing lens, liquid phase viscosity, surface condition.

---

**Шапарев Александр Васильевич** – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)  
E-mail: avshaparev@kai.ru

**Савин Игорь Алексеевич** – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)  
E-mail: savin.ia@kaichelny.ru

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОЛЕСА ОСЕВОЙ СТУПЕНИ КОМПРЕССОРА МАЛОГАБАРИТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Р.Р. Шарафутдинов, Ван Фууй, Ю.Б. Александров

Рассмотрен процесс проектирования осевой трансзвуковой ступени осецентрибежного компрессора турбовального двигателя мощностью 534 кВт. В газодинамическом расчете и при профилировании лопаток были учтены и применены рекомендации из различных источников. Спроектированная ступень, состоящая из рабочего колеса типа «блиск» и одного ряда лопаток направляющего аппарата, была рассчитана в программе ANSYS CFX. Для рабочего колеса был проведен совмещенный расчет в программе ANSYS Mechanical для первичной оценки прочности полученной конструкции.

**Ключевые слова:** трансзвуковая ступень, колесо компрессора типа «блиск», профилирование лопаток, густота решетки.

Одной из проблем создания малогабаритных двигателей является снижение кпд компрессора с уменьшением размеров проточной части. При уменьшении размеров осевых ступеней их кпд падает, и целесообразно применять центробежные и осецентрибежные компрессоры. Более высокие значения кпд в осецентрибежных компрессорах достигаются за счет приемлемой высоты лопаток последних осевых ступеней. Осецентрибежный компрессор имеет, как правило, меньшее число ступеней, меньшую габаритную длину и диаметр. Вместо многоступенчатого осевого компрессора может применяться схема с высоконапорной трансзвуковой осевой ступенью, степень повышения полного давления  $\pi_{ок}^*$  на которой может достигать значений 1,4...1,6 при больших окружных скоростях (380 м/с и более). Такая схема позволяет уменьшить количество деталей компрессора и получить приемлемые кпд, осевые и диаметральные габариты, а также низкую массу. Недостатком является то, что существование сверхзвуковых течений на входе в рабочее колесо делает ступень компрессора особо чувствительной к эрозионному износу лопаток.

В данной статье рассматривается процесс проектирования осецентрибежного компрессора с одной трансзвуковой ступенью и центробежным компрессором на основе обобщения сведений из различных литературных источников и проверка полученной конструкции численными методами.

Перед проектированием компрессора был произведен термогазодинамический расчет турбовального двигателя. Расчет производился на основе методик [1, 2].

Исходные данные для расчета:  $H = 0$ ;  $M_{II} = 0$ ;  $N_e = 534$  кВт;  $T_T^* = 1125$  К.

По зависимости удельной мощности и удельного расхода от  $\pi_k^*$  был выбран оптимальный  $\pi_k^* = 7,2$ . Учет малоразмерности проводился при назначении кпд компрессора ( $\eta_k^* = 0,8$ ) на основе графиков зависимости удельной мощности  $N_e$  и удельного расхода топлива  $C_e$  от степени повышения давления  $\pi_k^*$  и температуры газов  $T_T^*$  (при  $H = 0$ ,  $T_H^* = 0$ ,  $M_{II} = 0$  для газотурбинного двигателя (ГТД) со свободной турбиной мощностью  $N_e = 500 \div 1500$  кВт) из работы [3].

По результатам газодинамического расчета, расход воздуха через компрессор составил  $G_B = 2,908$  кг/с.

В качестве двигателя-прототипа был выбран турбовальный двигатель разработки Arriel 2B (Turbomeca). Конструкция данного двигателя приведена в руководстве к двигателю [4].

Газодинамический расчет осевой ступени производился на основе методик [5, 6], расчет центробежной ступени компрессора – на основе работ [7–10].

Эскиз проточной части рассчитанного компрессора приведен на рис. 1.

Проектируемый компрессор состоит из трансзвуковой осевой ступени, двухрядного направляющего аппарата, переходного канала между осевой и центробежной ступенями (для уменьшения скорости на входе в центробежный компрессор, уменьшения габаритов и центробежной нагрузки, действующей

на колесо центробежного компрессора), входного направляющего аппарата центробежного компрессора (в ходе расчетов оптимальный угол закрутки на входе в центробежный компрессор –  $75^\circ$ ), центробежного колеса, безлопаточного диффузора и двух лопаточных диффузоров.

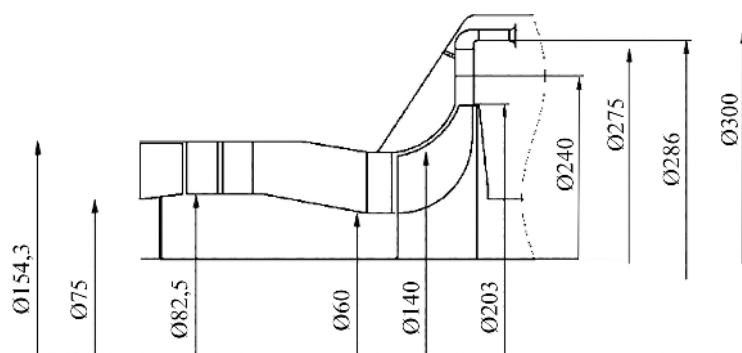


Рис. 1

В методиках [5, 6] производится расчет транс- и сверхзвуковых ступеней с переменным по радиусу энергообменом для первых ступеней турбореактивных двигателей. В данной работе эти методики с некоторыми корректировками была применены для расчета малоразмерной трансзвуковой осевой ступени компрессора.

Согласно работе [11] в малоразмерных ГТД осевую составляющую скорости в первых ступенях при трансзвуковом характере течения выбирают ниже, чем в полноразмерных ГТД. Это связано с необходимостью увеличить высоту лопаток и снизить величину вторичных и концевых потерь на трение в венцах.

Число Маха  $M_{w1}$  в периферийном сечении должно быть ограничено, так как при умеренных сверхзвуковых скоростях потока ( $M_{w1} \leq 1,3 \div 1,5$ ) потери в скачке малы, а повышение давления велико. Это значит, что в сверхзвуковой компрессорной решетке можно использовать торможение потока в системе скачков небольшой интенсивности при незначительном увеличении потерь по сравнению с бескачковым торможением. Необходимо обеспечить профилирование лопаток, чтобы скачки не вызывали отрыв пограничного слоя от спинки лопатки.

Согласно таблице в периферийном сечении максимальная относительная скорость имела чуть большее значение  $M_{w1} \approx 1,54$ , что было продиктовано необходимостью получения высокой степени сжатия в ступени. Также согласно работе [11] в случае осевого входа потока в ступень правильность выбора значений  $U_{1k}$  (окружная скорость на входе в периферийном сечении) и  $C_{1a}$  необходимо контролировать и по величине угла входа потока у концов лопаток:

$$\beta_{1k} = \arctg \frac{C_{1a}}{U_{1k}} \geq 23^\circ. \quad (1)$$

Это ограничение обусловлено предельной аэродинамической нагруженностью лопаточных венцов, которая определяется величиной допустимой диффузорности межлопаточных каналов, а также возможностью поворота потока на выходе из ступени до заданного направления.

В ходе нескольких итераций были полученные следующие значения скоростей, удовлетворяющих приведенным условиям: осевая скорость на входе  $C_{1a} = 185$  м/с, что при  $T_1^* = 288,15$  К соответствует  $\lambda_a = 0,595$ ; окружная скорость на концах лопаток  $U_k = 389,46$  м/с.

Степень повышения давления  $\pi_{ct}^* = 1,44$  была назначена для осевой ступени в ходе нескольких итерационных расчетов осевой и центробежной ступеней, которые выполнялись для достижения на обеих ступенях умеренных сверхзвуковых течений.

Параметры	Номер сечения									
	Вход в рабочее колесо					Выход из рабочего колеса				
$i$	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
$\bar{r}_i$	1	0,909	0,807	0,691	0,55	1	0,909	0,807	0,691	0,55
$U_i = U_{1k} \bar{r}_i$	389,6	353,878	314,294	268,946	214,203	389,6	353,878	314,294	268,946	214,203
$C_u$	0	0	0	0	0	101,26	108,043	116,112	127,217	146,578
$C_a$	185	185	185	185	185	167,514	162,169	154,974	146,831	139,908
$C_i = \sqrt{C_{ai}^2 + C_{ui}^2}$	185	185	185	185	185	195,74	194,864	193,646	194,277	202,632
$a_{kpi} = 18,3\sqrt{T_i^*}$	310,561	310,561	310,561	310,561	310,561	331,043	330,437	329,558	328,404	326,972
$\lambda_{ci} = \frac{C_i}{a_{kpi}}$	0,596	0,596	0,596	0,596	0,596	0,591	0,59	0,588	0,592	0,62
$W_i = \sqrt{C_{ai}^2 + (U_i - C_{ui})^2}$	431,17	399,318	364,7	326,43	283,033	333,347	294,506	251,581	204,075	155,394
$T_{wi}^* = T_i^* + \frac{U_i^2}{2C_p}$	363,48	350,3	337,1	323,9	310,8	363,462	350,303	337,145	323,986	310,827
$\bar{\lambda}_{wi} = \frac{W_i}{18,3\sqrt{T_{wi}^*}}$	1,39	1,286	1,174	1,051	0,911	1,073	0,948	0,81	0,657	0,5
$M_w$	1,538	1,379	1,222	1,062	0,896	1,538	1,379	1,222	1,062	0,896
$T_i = T_i^* \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_{ci}^2\right)$	270,97	270,97	270,97	270,97	270,97	308,172	307,146	305,649	303,26	298,807
$P_i = P_i^* \left(\frac{T_i}{T_i^*}\right)^{\frac{k}{k-1}}$	81856	81856	81856	81856	81856	12530	124035	122198	119231	113625
$\rho = \frac{P_i}{RT_i}$	1,051	1,051	1,051	1,051	1,051	1,415	1,406	1,392	1,368	1,324
$\alpha_i = \arccos\left(\frac{C_{ui}}{C_i}\right)$	90	90	90	90	90	58,8	56,3	53,2	49,1	43,7
$\beta_i = \arccos\left(\frac{U_i - C_{ui}}{W_i}\right)$	25,509	27,6	30,482	34,523	40,816	30,2	33,43	38,02	46,01	64,2

Коэффициенты теоретического напора для периферийного и втулочного сечений:

$$\bar{H}_{\text{TK}} = \frac{H_{\text{TK}}}{U_{\text{K}}^2}, \quad (2)$$

где  $H_{\text{TK}}$  – затраченный напор в периферийном сечении;

$$\bar{H}_{\text{BT}} = \frac{H_{\text{BT}}}{U_{\text{K}}^2}, \quad (3)$$

где  $H_{\text{BT}}$  – затраченный напор во втулочном сечении.

Данные коэффициенты выбирались в рекомендованном диапазоне 0,2...0,24 для компрессоров с высокими окружными скоростями. Однако согласно работе [7] на выходе из ступени радиальная неравномерность полного давления не должна превышать 10–15 %. В несколько итераций были подобраны коэффициенты, удовлетворяющие данному условию с обеспечением  $\pi_{\text{CT}}^* = 1,44 - \bar{H}_{\text{TK}} = 0,26$ ,  $\bar{H}_{\text{BVT}} = 0,207$ ; кпд трансзвуковой ступени был принят равным  $\eta_{\text{CT}}^* = 0,87$ .

Расчет производился для семи сечений, однако два последних сечения являются дополнительными для обеспечения полного пересечения лопатки с диском. Результаты расчета для сечений 1–5 приведены в таблице.

Проведем расчет сечений лопаток рабочего колеса и направляющего аппарата.

Профилирование проводилось по методике [12]. По проекту, для поворота потока на заданный угол требуется двухрядный направляющий аппарат. В данной работе для упрощения была спроектирована и рассчитана ступень только с одним направляющим аппаратом.

С учетом рекомендаций были назначены характерные параметры решетки: относительная густота в периферийном сечении  $\frac{b_k}{t_k} = 1,2$ ; парусность  $\frac{b_k}{b_{вт}} = 1,2$ ; удлинение лопаток  $\bar{h} = \frac{h_{л}}{b_{ср}} = 1$ ; относительная толщина  $\bar{C}_k = 0,05$ ,  $\bar{C}_{вт} = 0,07$ .

С учетом малоразмерности ступени компрессора были допущены некоторые отклонения от рекомендаций. Так, лопатка выполнена широкохордной, что позволяет увеличить напорность ступени. Относительная толщина в периферийном сечении была принята больше рекомендуемой, так как хорда лопатки у малоразмерного двигателя намного меньше, чем у вентиляторных лопаток, поэтому при малых значениях  $\bar{C}_k$  лопатка в периферийном сечении получается слишком тонкой. Угол атаки (между направлением относительной скорости потока и касательной к средней линии профиля в его передней кромке)  $i = \beta_{1л} - \beta_1$  определяется по эмпирической зависимости, полученной на основе результатов продувок сверхзвуковых решеток профилей [13]:

$$i = k_0 i_0 + \Delta M_{w1} + m' \Delta \beta, \quad (4)$$

где  $i_0$  – угол атаки испытанных лопаток 10 %-й толщины с нулевым изгибом угла для профиля NASA 65-(A<sub>10</sub>);  $k_0$  – поправочный коэффициент, учитывающий реальную толщину профиля;  $\Delta M_{w1}$  – слагаемое, учитывающее влияние числа Маха;  $m'$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние угла изгиба профиля;  $\Delta \beta = \beta_2 - \beta_1$  – угол поворота потока в решетке.

Угол отставания потока (между направлением относительной скорости потока и касательной к средней линии профиля в его задней кромке)  $\delta = \beta_{2л} - \beta_2$  вычисляются по эмпирической зависимости (5) из работы [12]:

$$\delta = \frac{m_f \sqrt{t/b} (\Delta \beta - i)}{1 - m_f \sqrt{t/b}} + 12,15 \bar{C} \left( 1 - \frac{\Delta \beta}{8} \right) + 3,33 (M_{w1} - 0,75), \quad (5)$$

где  $m_f$  – опытный коэффициент, учитывающий влияние угла установки профиля и положение максимальной толщины профиля. Второе слагаемое в этой формуле следует находить в диапазоне  $0 < \Delta \beta < 8^\circ$ , третье – в диапазоне  $0,75 < M_{w1} < 1,3$ .

В данной работе коэффициенты для расчетов взяты из графиков для профиля NASA 65-(A<sub>10</sub>) из работ [14, 12].

Геометрические углы лопатки определены по формулам

$$\beta_{1л} = \beta_1 + i; \quad (6)$$

$$\beta_{2л} = \beta_2 + \delta; \quad (7)$$

$$\theta = \Delta \beta + \delta - i. \quad (8)$$

Для построения профиля рассчитаны геометрические размеры средней линии. Схема построения средней линии приведена на рис. 2. Также проведен расчет межлопаточных каналов как плоских эквивалентных диффузоров и вычислен их угол раскрытия.

По измеренным диаметрам  $A_r$  (горло решетки) построенных решеток был проведен расчет на запыление. Изображение спрофилированной лопатки и рабочего колеса приведено на рис. 3.

Профилирование лопатки направляющего аппарата производилось по методике [7]. Спрофилированная лопатка изображена на рис. 4.

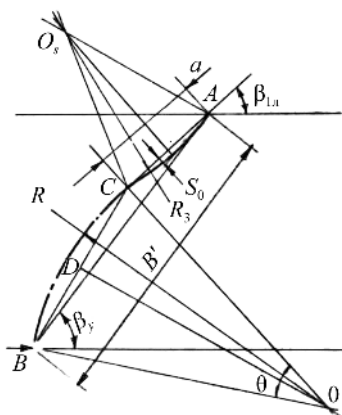


Рис. 2

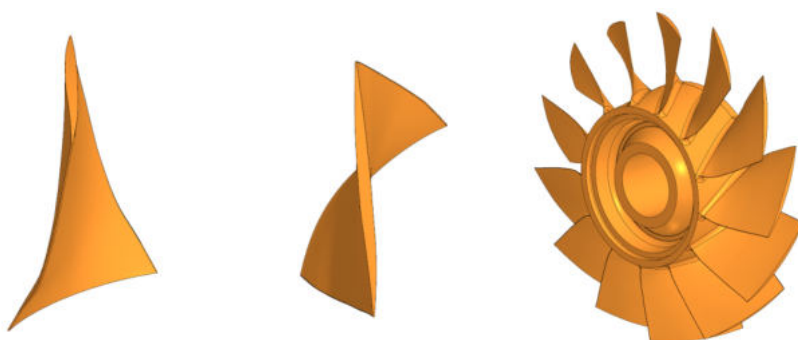


Рис. 3

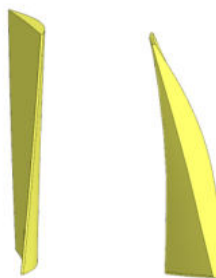


Рис. 4

Численный расчет осевой трансзвуковой ступени компрессора проводился по методике [15]. Расчетная сетка для рабочего колеса состояла из 900000 элементов, значение числа Рейнольдса, характерного для данного венца, – 559983 (метод  $Y^+$ ). Расчетная сетка для направляющего аппарата состояла из 800000 элементов, число Рейнольдса – 475903.

Заданные граничные условия: число оборотов  $n = 49914,173$ , полное давление на входе  $p = 101325$ , статическое давление на выходе в первом приближении из газодинамического расчета ступени принято равным  $p = 122000$  Па, в дальнейшем давление на выходе по ходу схождения решения уточнялось до среднего из газодинамического расчета  $p = 123000$  Па. Во вкладке «Материалы» выбран идеальный газ и назначены уравнения и коэффициенты для расчета свойств газа. Зависимость динамической вязкости от температуры задавалась по формуле Сатерленда, которая может быть применена для температур в диапазоне  $0 < T < 500$  и при давлениях менее 3,45 МПа [16], что справедливо для данного расчета.

Приведем контурные картины по числу Маха (рис. 5, а, б), изменению полного давления в абсолютной и относительной системе координат (рис. 5, в), а также по изменению статического давления на 80 % от высоты канала (рис. 5, г).

Характеристики потока на поперечном разрезе представлены на рис. 6: а – контурная картина по числам Маха на продольном разрезе; б – линии тока на продольном разрезе.

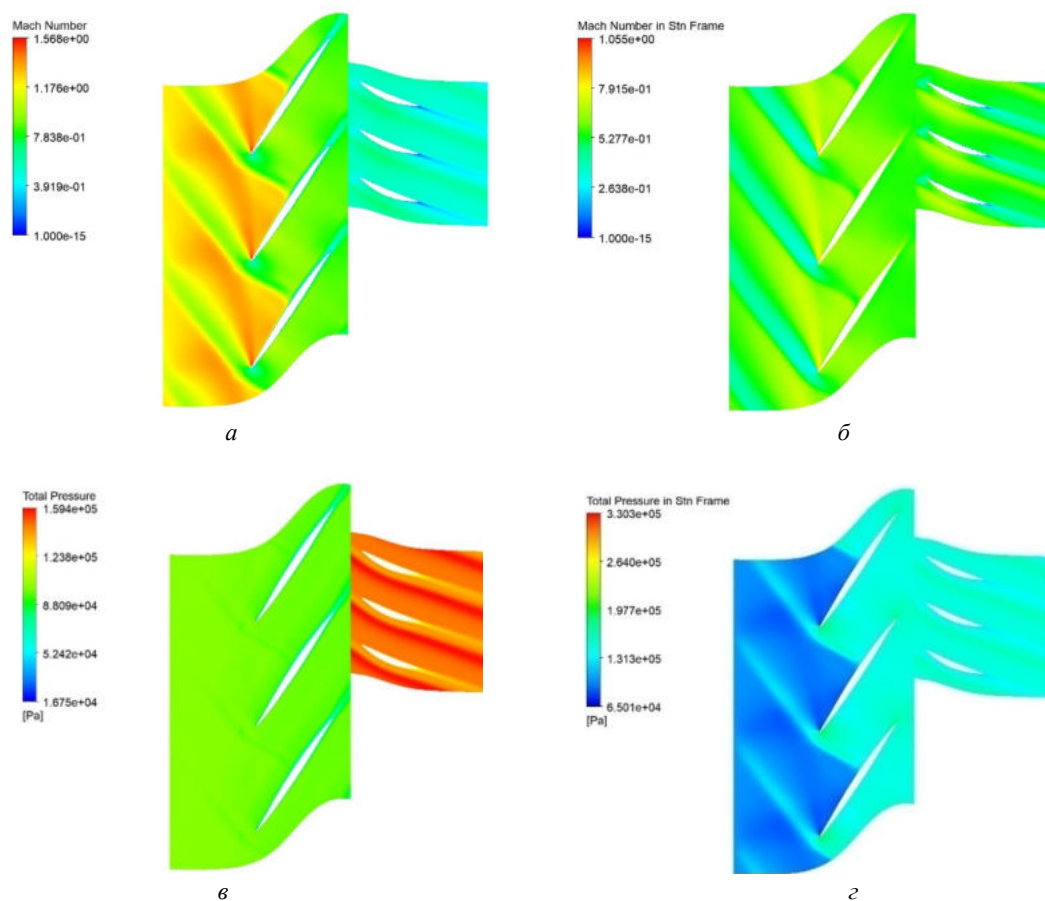


Рис. 5

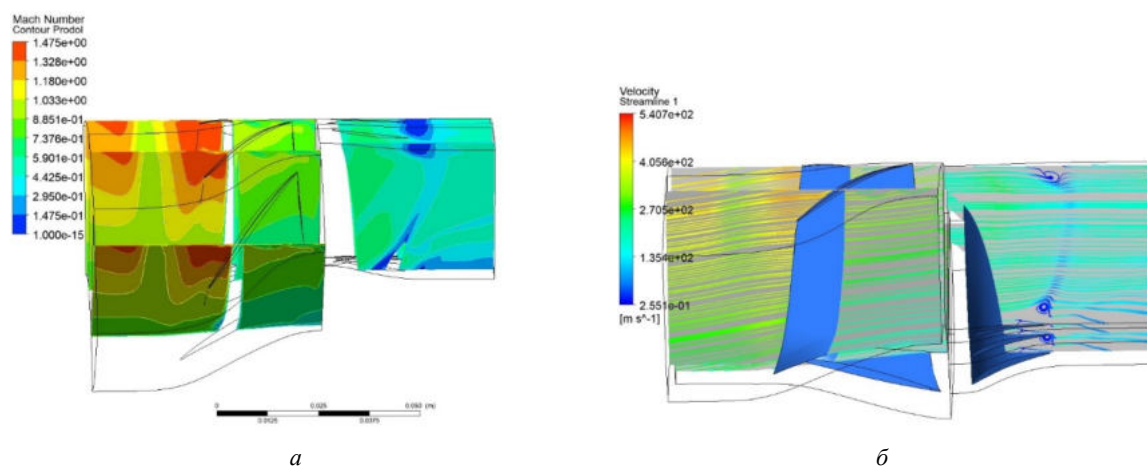


Рис. 6

Проведем анализ результатов расчета.

Косые скачки уплотнения в периферийном сечении доходят до 50 % хорды, что согласуется с построением профиля (входная часть до 50 % профиля выполнена с минимальной кривизной). Затем идет торможение потока до дозвуковой скорости. В периферийном сечении направляющего аппарата наблюдается отрыв, и треугольник скоростей в данном сечении на входе в направляющий аппарат сильно отличается от расчетного, что может быть связано с пониженным значением осевой скорости. В целом картина течения в сечениях рабочего колеса, полученная CFX-расчетом, соответствует теоретической. По высоте лопатки относительная скорость на входе убывает, зона скачка уплотнения уменьшается. Во втулочном сечении наблюдается крупный отрыв со спинки направляющего аппарата.

На выходе из направляющего аппарата было вычислено полное давление, осредненное по площади, и расход воздуха через расчетный сектор направляющего аппарата. Рассчитана степень сжатия ступени, что составило  $\pi_{ст}^* = 1,42$ ,  $\eta_{ст}^* = 0,833$ . Степень сжатия в рабочем колесе  $\pi_{ст}^* = 1,445$ , его КПД  $\eta_{ст}^* = 0,877$ .

Таким образом, рабочее колесо выдает заложенную степень сжатия  $\pi_{рк}^*$ , имеет достаточно высокий для трансзвуковых (сверхзвуковых) колес КПД, однако ступень не выдает требуемый расход (разница – 0,433 кг/с, или около 15%). Как видно, основные потери и отрывы в ступени возникают в периферийной и втулочной областях направляющего аппарата. Отличие параметров потока от проектировочных в периферийном и втулочном сечениях предположительно связано с нарастанием пограничного слоя на стенках кольцевых каналов и наличием перетечек через радиальный зазор в периферийном сечении.

Расчет диска для упрощения производился в осесимметричной постановке. В качестве материала был выбран титановый сплав ВТ3-1. Была построена автоматическая сетка с размером элементов 0,5 мм.

Из CFX-расчета было подгружено поле давлений на поверхности лопатки со стороны корыта (рис. 7, а) и спинки (рис. 7, б).

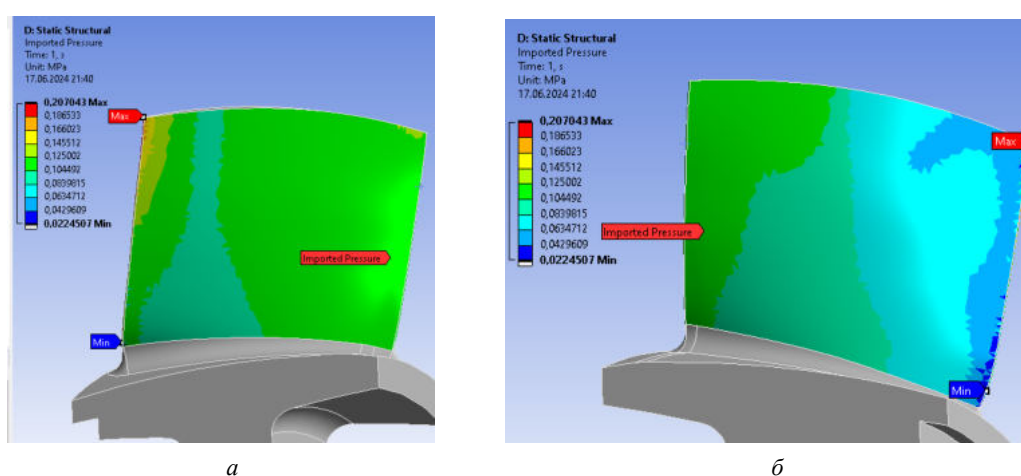


Рис. 7

В качестве граничных условий задана частота вращения рабочего колеса (49914 об/мин) (рис. 8) и ограничено перемещение цилиндрической поверхности ступицы.

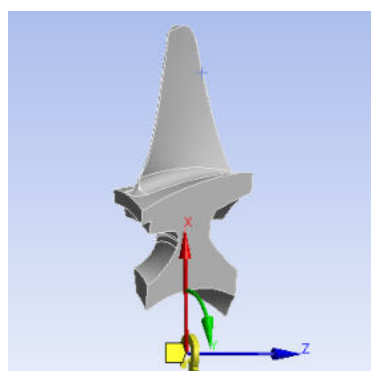


Рис. 8

В качестве результатов выводятся полные деформации на спинке (рис. 9, а) и корыте (рис. 9, б), эквивалентные напряжения по Мизесу на спинке (рис. 10, а) и корыте (рис. 10, б), коэффициент запаса прочности на спинке (рис. 11, а) и корыте (рис. 11, б).

Коэффициент запаса прочности оценивается по пределу прочности материала  $\sigma_b$ . Как видно из рис. 10, максимальные напряжения сосредоточены в области корневого сечения пера лопатки. Мини-



мальный коэффициент запаса прочности  $k \geq 1,5$ . Рабочее колесо удовлетворяет требованиям по коэффициенту запаса прочности, так как  $k_{\min} = 1,8257$  (см. рис. 11).

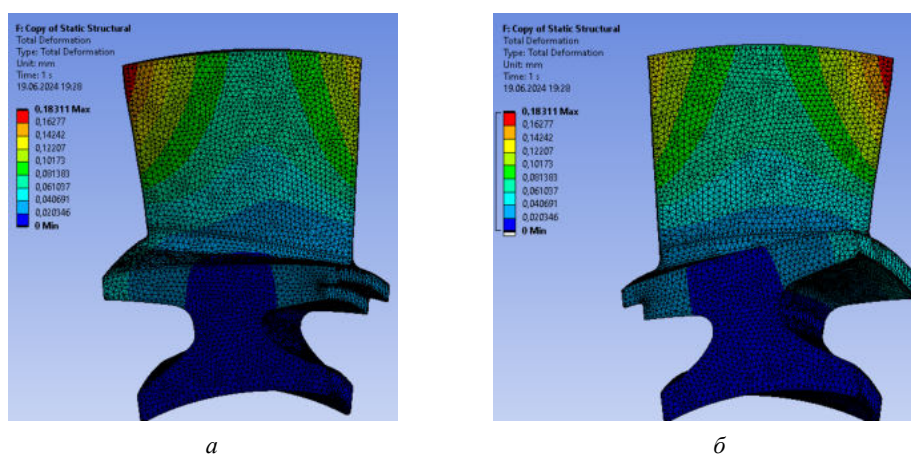


Рис. 9

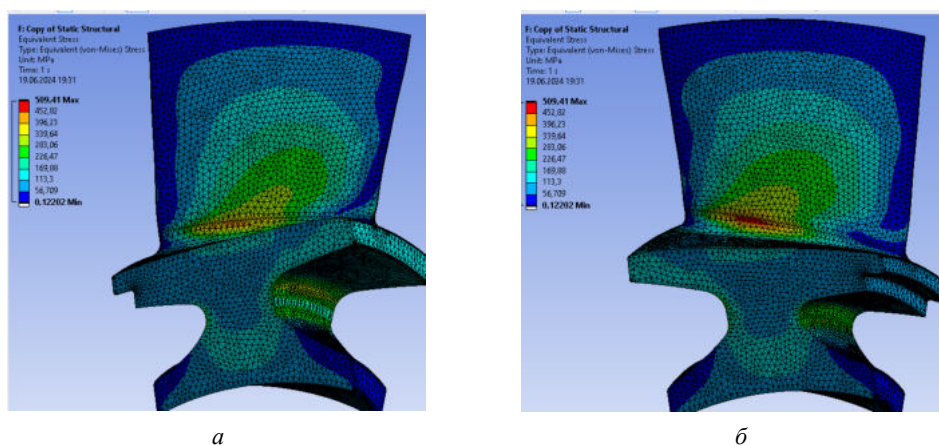


Рис. 10

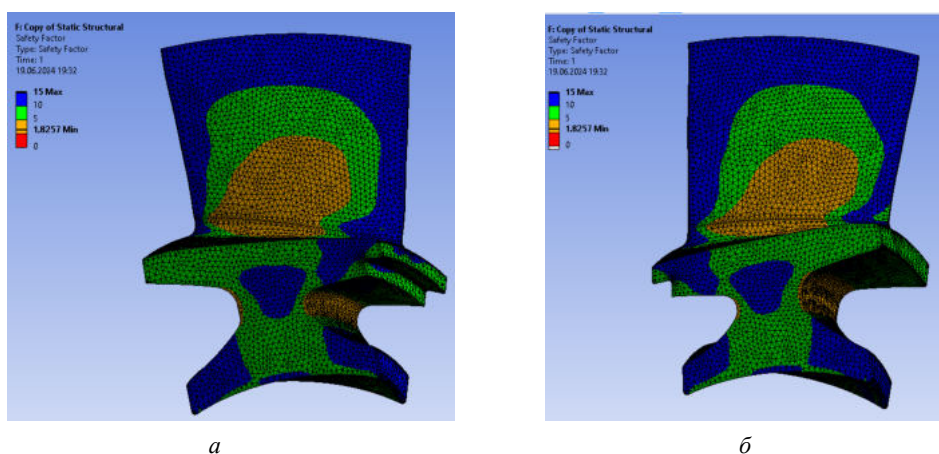


Рис. 11

В данной работе не проводился расчет собственных колебаний лопаток и оценка уровня виброннапряжений. Методика прогнозирования уровня виброннапряжений в лопатках ГТД с применением совмещенного прочностного и газодинамического расчета в программе ANSYS приведена в работе [17].

Для оценки плавности изгиба профиля, приемлемости толщины его входной кромки и оценки возможности изготовления (обработки на станке) сектор колеса был распечатан на 3D-принтере. На рис. 12, *a* показан вид спереди, на рис. 12, *б* – вид сверху.

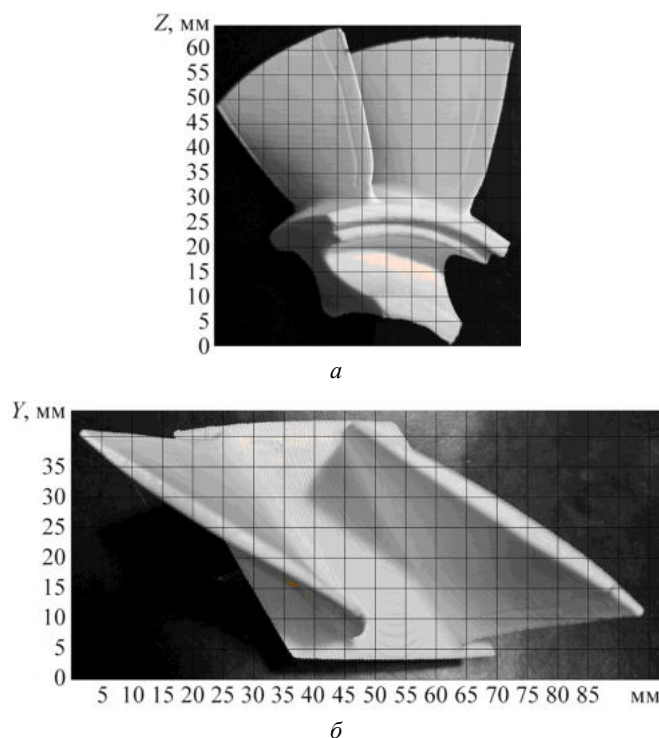


Рис. 12

Таким образом, спроектирована осевая трансзвуковая ступень с широкохордной лопаткой и рабочим колесом типа «блиск» для малоразмерного двигателя на основе обобщения данных из различных источников. Необходима дальнейшая доработка спроектированной ступени, однако согласно численным расчетам рабочее колесо демонстрирует достаточно высокие характеристики и по первичным оценкам удовлетворяет условиям прочности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булавкин А.А., Рогожин Б.А. Выбор параметров, термогазодинамический расчет и расчет ВСХ ТРД, ДТРД и ТВД. Казань: КАИ, 1985. 67 с.
2. Дудин Л.А., Засела Ю.К., Костерин В.А. Термогазодинамический расчет и расчет высотно-скоростных характеристик турбовинтовых и турбовальных двигателей. Казань: КАИ, 1983. 35 с.
3. Григорьев В.А. и др. Вертолетные газотурбинные двигатели. М.: Машиностроение, 2007. 490 с.
4. Turbo shaft Engine Arriel 2B-2B1. Turbomecasnesma Group. Training Manual. Ref. X292 M5 960 2. France, 2003. 464 p.
5. Анютин А.Н. Газодинамический расчет сверхзвуковой ступени осевого компрессора на ЭВМ. Харьков: ХАИ, 1988. 33 с.
6. Анютин А.Н. Газодинамический расчет трансзвуковой ступени осевого компрессора на ЭВМ. Харьков: ХАИ, 1986. 33 с.
7. Белоусов А.Н. и др. Проектный термогазодинамический расчет основных параметров авиационных лопаточных машин. Самара: СГАУ, 2006. 316 с.
8. Холщевников К.В. Теория и расчет лопаточных машин. М.: Машиностроение, 1970. 610 с.
9. Коваль В.А. Формирование облика ГТД с осецентричным компрессором. Харьков: ХАИ, 1991. 66 с.
10. Бекнев В.С., Куфтов А.Ф., Тумашев Р.З. Расчет и проектирование центробежных компрессоров ГТД. М.: МГТУ, 1996. 44 с.
11. Васильев Б.П. и др. Основы проектирования газотурбинных двигателей и установок. Харьков: Кон-траст, 2005. 376 с.
12. Буслик Л.Н. Профилирование лопаток транс- и сверхзвуковых компрессорных ступеней. Харьков: ХАИ, 1987. 44 с.
13. Boyce M.P. Design of Compressor Blades Suitable for Transonic Axia. Flow Compressors // Proc. of ASME. 1967. № 67. Article № GT-47.
14. Aerodynamic Design of Axial-Flow Compressors [Electronical Resource]. URL: <https://ntrs.nasa.gov/citations/19650013744> (дата обращения: 20.05.2025).

15. Батурин О.В. и др. Исследование рабочего процесса в ступени осевого компрессора с помощью универсального программного комплекса ANSYS CFX. Самара: СГАУ, 2011. 112 с.
16. Викторов М.М. Методы вычисления физико-химических величин и прикладные расчеты. Л.: Химия, 1977. 360 с.
17. Журавлев Р.В. и др. Изменение температурного поля на выходе из многофорсуночной камеры сгорания при различных режимах работы двигателя // Тр. МАИ [Электронный журнал]. 2013. № 65. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=35861> (дата обращения: 20.05.2025).

Поступила в редколлегию 20.06.25

## DESIGN OF THE AXIAL ROTOR OF A SMALL-SIZED ENGINE COMPRESSOR STAGE

R.R. Sharafutdinov, Wang Fuyu, and Yu.B. Aleksandrov

This paper presents the design process of an axial transonic stage for an axial-centrifugal compressor of a 534 kW turboshaft engine. Recommendations from various sources were considered and applied in the gas-dynamic calculation and airfoil profiling. The designed stage, consisting of a blisk-type rotor and a single row of stator vanes, was analyzed using ANSYS CFX software. A coupled analysis was performed for the rotor in ANSYS Mechanical to provide a preliminary strength assessment of the resulting design.

**Keywords:** transonic stage, blisk-type compressor rotor, airfoil profiling, cascade solidity.

---

**Шарафутдинов Рамис Равильевич** – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)  
E-mail: ramissharafutdinov15@gmail.com

**Ван Фуюй** – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)  
E-mail: VanF@stud.kai.ru

**Александров Юрий Борисович** – канд. хим. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)  
E-mail: Alexwischen@rambler.ru

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ НА ОСНОВЕ ПИД-РЕГУЛЯТОРА

В.Г. Макаров, Г.В. Вагапов, Н. Несрин

Проведена разработка и оценка метода управления с использованием ПИД-регулятора для улучшения управления скоростью и крутящим моментом в электроприводах беспилотных летательных аппаратов. Разработана динамическая модель квадрокоптера на основе модели Ньютона – Эйлера и проведен анализ устойчивости линейных и нелинейных методов управления на основе ПИД-регулятора с использованием теоремы Ляпунова. Осуществлено математическое моделирование электроприводов с учетом интеграции операционных усилителей. Предложенные алгоритмы управления электроприводов реализованы на имитационных моделях и демонстрируют устойчивую работу.

**Ключевые слова:** беспилотные летательные аппараты, двигатель постоянного тока, управление скоростью и моментом, режимы работы, ПИД-регулятор, группа электроприводов.

Беспилотные летательные аппараты (БЛА) являются одним из наиболее динамично развивающихся сегментов современной робототехники. Летаящие роботы управляются дистанционно или могут быть запрограммированы на автономную работу, применяются во многих областях, включая доставку посылок, мониторинг инфраструктуры, орошение сельскохозяйственных угодий и поисково-спасательные операции.

Квадрокоптеры – это многороторные воздушные роботы, для привода которых преимущественно используются четыре электропривода, расположенные симметрично на раме. Основу каждого электропривода составляет двигатель постоянного тока, а совокупная тяга всех двигателей обеспечивает создание подъемной силы, устойчивость и маневренность. Основные компоненты квадрокоптера – двигатели постоянного тока, обеспечивающие движение за счет контролируемого крутящего момента и скорости; аккумулятор (например, LiPo 4S), обеспечивающий питание для продолжительного полета, обычно длящегося до 15 мин; рама, легкая конструкция, разработанная для минимизации веса при обеспечении стабильности и прочности; датчики, гироскопы, акселерометры и магнитометры, измеряющие угловые положения и скорости для обеспечения точности управления [1].

Функциональность квадрокоптера в значительной степени зависит от синхронизации этих компонентов, обеспечивающих стабильный полет и реакцию на возмущения окружающей среды. Квадрокоптеры являются нелинейными системами с шестью степенями свободы, включая три поступательных ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  – оси движения квадрокоптера в инерциальной системе отсчета) и три вращательных (тангаж, крен, рысканье) движения. Основные проблемы – это нелинейность, связанная с динамикой между поступательными и вращательными движениями [2], которая усложняет разработку системы управления и ее оптимизацию; внешние возмущения, факторы окружающей среды (ветер, турбулентность, смещение полезной нагрузки), влияющие на устойчивость и маневренность; сложность управления, поддержание точного контроля над множеством входов (скорости вращения ротора) для достижения желаемых выходов (движение и ориентация). Для решения этих динамических задач требуются численные математические модели и эффективные системы управления с целью обеспечения надежности функционирования.

Среди множества конструкций БЛА значительную долю составляют квадрокоптеры благодаря компактным размерам, легкости конструкции и способности выполнять сложные маневры [3]. Однако вследствие высокого уровня нелинейности по некоторым параметрам (например, угловые скорости по

различным осям, ускорения, чувствительность к внешним возмущениям) возникают определенные проблемы для достижения точного и стабильного управления.

Важнейшим аспектом функциональности БЛА является его система управления, которая обеспечивает точное регулирование скорости и крутящего момента двигателей электроприводов. Управление скоростью и крутящим моментом двигателей играет ключевую роль в поддержании стабильности полета, отслеживании траектории и маневренности в динамических условиях эксплуатации [4]. Для приведения квадрокоптеров в движение в большинстве случаев используются двигатели постоянного тока, поэтому оптимизация систем управления этими двигателями необходима для повышения производительности, энергоэффективности и надежности. Ключевой целью данной статьи является повышение эффективности управления БЛА за счет использования ПИД-регуляторов и компьютерное моделирование предложенного решения.

Основные подходы к решению проблемы управления скоростью двигателей БЛА [5] включают методы Рунге – Кутты, Зейделя, Эйлера и т.д.

На рис. 1 показана принципиальная схема технической реализации управления скоростью БЛА [6], которая является одним из наиболее часто встречающихся вариантов исполнения.

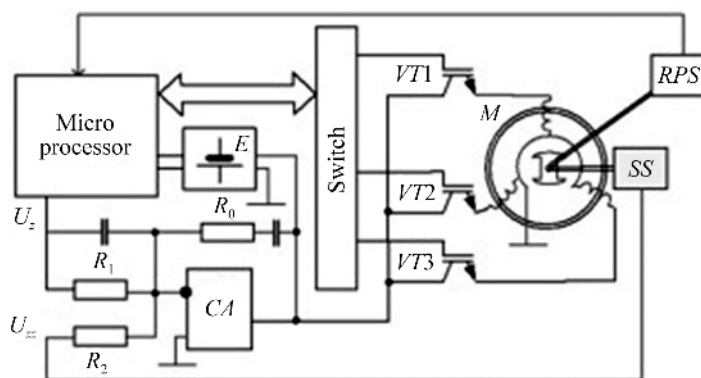


Рис. 1

На схеме (рис. 1) представлены транзисторы ( $VT1-VT3$ ), осуществляющие управление током, поступающим от источника питания  $E$  к обмоткам статора.

Подача управляющих команд от микропроцессора регулирует работу транзисторов. Микропроцессор управляет переключателем после обработки входных данных от датчика положения ротора  $RPS$ . Двигатель включается, разгоняется, а затем переходит в установившийся или динамический режим работы. Это гарантирует, что БЛА будет функционировать на любой скорости. В основе работы датчика положения ротора лежит фотоэлектрический или индуктивный принцип, также в ряде случаев используются датчики Холла [7]. Подобное конструктивное решение используется во многих БЛА.

ПИД-регулятор – один из самых популярных и эффективных вариантов построения системы управления для электроприводов БЛА [8]. Благодаря простоте использования, универсальности и эффективности он является основным вариантом для управления динамикой квадрокоптера, включая тангаж, крен, рысканье и высоту [9]. Системы управления на основе ПИД-регуляторов позволяют БЛА работать более плавно, допускать меньше ошибок и эффективнее реагировать на возмущения окружающей среды. Интеграция ПИД-регуляторов с целью повышения эффективности работы представлена в данной статье по результатам исследования с помощью математического моделирования систем управления квадрокоптера как одного из видов БЛА.

### Математическое моделирование динамики квадрокоптера

Модель Ньютона – Эйлера является одним из фундаментальных подходов к описанию динамики квадрокоптера. Она описывает связь между силами и моментами, действующими на квадрокоптер, и его

результатирующим движением. С использованием метода Ньютона – Эйлера можно описать вращательную динамику квадрокоптера в виде нелинейной математической модели, которая характеризует его движение [10].

Уравнение угловой скорости вокруг оси крена:

$$\ddot{\theta} = \frac{bU_3}{I_Y} + \dot{\phi} \frac{I_{\text{rotor}}(\Omega_4 + \Omega_2 - \Omega_1 - \Omega_3)}{I_Y} + \frac{I_Z - I_X}{I_Y} \dot{\phi} \dot{\psi}. \quad (1)$$

Уравнение угловой скорости вокруг оси тангажа:

$$\ddot{\psi} = \frac{1}{I_Z} + \frac{I_X - I_Y}{I_Z} \dot{\phi} \dot{\psi}. \quad (2)$$

Уравнение угловой скорости по оси рыскания:

$$\ddot{\phi} = \frac{lU_2}{I_X} + \dot{\theta} \frac{J_m(\Omega_1 + \Omega_3 - \Omega_2 - \Omega_4)}{I_X} + \frac{I_Y - I_Z}{I_X} \dot{\phi} \dot{\psi}. \quad (3)$$

Уравнение ускорения по оси  $z$ :

$$\ddot{z} = -g + (\cos \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m}. \quad (4)$$

Уравнение ускорения по оси  $x$ :

$$\ddot{x} = (\sin \phi \sin \psi + \cos \phi \sin \theta \cos \psi) \frac{U_1}{m}. \quad (5)$$

Уравнение ускорения по оси  $y$ :

$$\ddot{y} = (-\cos \psi \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi) \frac{U_1}{m}. \quad (6)$$

Здесь:  $\ddot{\theta}$  – вторая производная угловой скорости  $\theta$ ;  $\ddot{\psi}$  – вторая производная угловой скорости  $\psi$ ;  $\ddot{\phi}$  – вторая производная угловой скорости  $\phi$ ;  $\dot{\theta}$  – первая производная угловой скорости  $\theta$ ;  $\dot{\psi}$  – первая производная угловой скорости  $\psi$ ;  $\dot{\phi}$  – первая производная угловой скорости  $\phi$ ;  $\phi, \theta, \psi$  – углы Крылова, позволяющие определить положение квадрокоптера в инерциальной системе отсчета;  $J_m$  – момент инерции ротора двигателя,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $I_{\text{rotor}}$  – момент инерции двигателя в квадрокоптере,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $I_X, I_Y, I_Z$  – момент инерции вдоль осей  $X, Y, Z$ ,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $\Omega_i$  – скорость каждого двигателя,  $\text{рад/с}$ ;  $b$  – коэффициент дальности полета,  $\text{кг} \cdot \text{м/рад}$ ;  $g$  – ускорение свободного падения  $9,8 \text{ м/с}^2$ ;  $l$  – расстояние между пропеллером и центром тяжести квадрокоптера:

$$\begin{cases} U_1 = b(\Omega_1^2 + \Omega_2^2 + \Omega_3^2 + \Omega_4^2); \\ U_2 = b(\Omega_4^2 - \Omega_2^2); \\ U_3 = l(\Omega_3^2 - \Omega_1^2); \\ U_4 = d(\Omega_1^2 - \Omega_2^2 + \Omega_3^2 - \Omega_4^2), \end{cases} \quad (7)$$

где  $d$  – коэффициент сопротивления, зависящий от изготовления приводного винта и скорости вращения двигателя;  $U_1, U_2, U_3, U_4$  – управляющие входы системы [11].

Управляющие входы системы описываются следующим образом:  $U_1$  подает общую тягу на каждый из двигателей, чтобы увеличить высоту полета (рис. 2, а);  $U_2$  изменяет тягу между двигателями 2 и 4, чтобы повернуть квадрокоптер (рис. 2, б);  $U_3$  изменяет тягу между двигателями 3 и 1, чтобы наклонить квадрокоптер (рис. 2, в);  $U_4$  изменяет тягу двигателей 2 и 4 и таким же образом изменяет тягу двигателей 1 и 3 для снижения рыскания квадрокоптера (рис. 2, г).

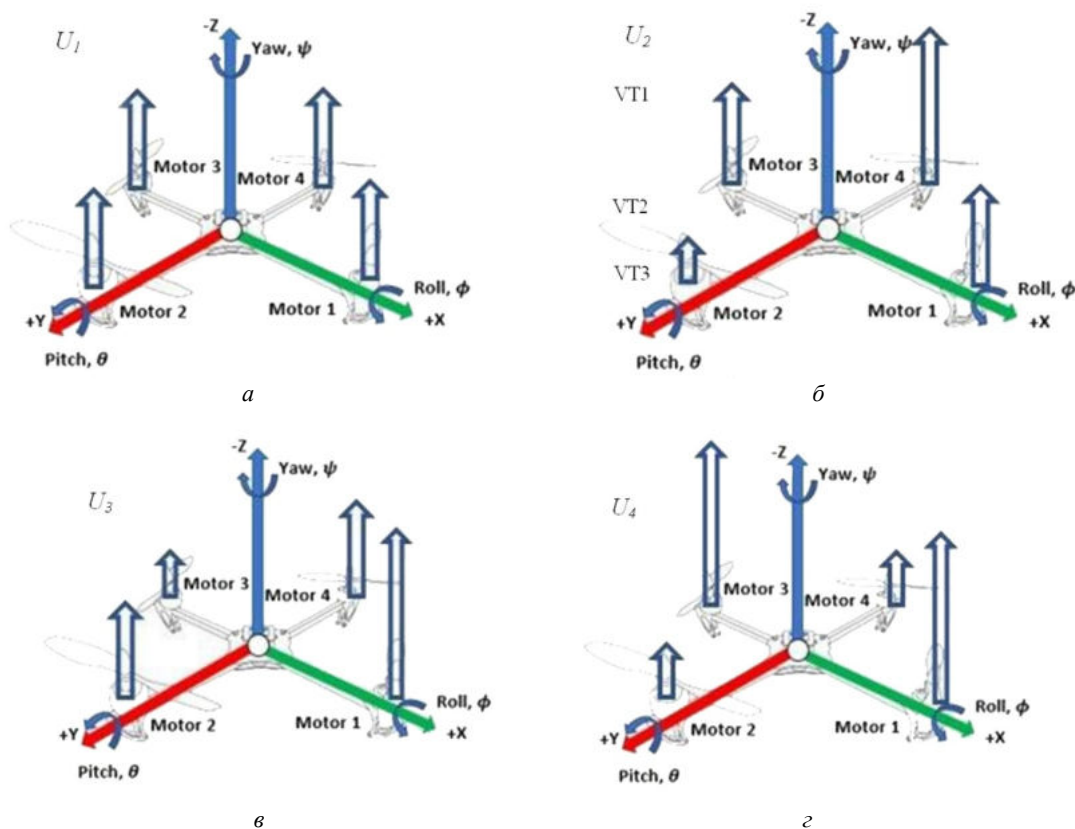


Рис. 2

Используя уравнения (7), возможно определить значения скоростей вращения каждого двигателя  $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3, \Omega_4$  из четырех двигателей:

$$\begin{bmatrix} \Omega_1^2 \\ \Omega_2^2 \\ \Omega_3^2 \\ \Omega_4^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & k_2 & k_3 \\ k_1 & -k_2 & k_2 & -k_3 \\ k_1 & -k_2 & -k_2 & k_3 \\ k_1 & k_2 & -k_2 & -k_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$k_1 = \frac{1}{4lbb \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)} k_2 = \frac{-1}{4b} k_3 = \frac{1}{4d}.$$

Динамическое моделирование двигателя квадрокоптера можно осуществить на основе уравнений машины постоянного тока и фундаментального принципа динамики [12]:

$$L \frac{di}{dt} = u - R_{\text{mot}} i - k_e \omega_m; \quad (9)$$

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} = \tau_m - \tau_d, \quad (10)$$

где  $u$  – напряжение питания двигателя, В;  $L$  – индуктивность двигателя, Гн;  $R_{\text{mot}}$  – сопротивление двигателя, Ом;  $i$  – ток двигателя, А;  $\omega_m$  – угловая скорость вращения ротора двигателя, рад/с;  $\tau_m$  – электромагнитный момент двигателя, Н·м;  $\tau_d$  – статический момент квадрокоптера, Н·м.

ПИД-регулятор в общем случае может быть представлен следующей передаточной функцией:

$$G_c(p) = \frac{k_d p^2 + k_p p + k_i}{p}, \quad (11)$$

где  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_d$  – пропорциональный, интегральный и производный коэффициенты усиления в ПИД-регулировании.

Передаточная функция модели контроллер/система изменяется при наличии обратной связи (рис. 3). Без обратной связи передаточная функция системы может быть определена перемножением передаточных функций регулятора и установки.

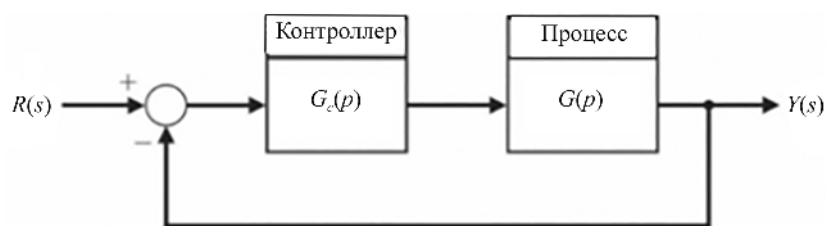


Рис. 3

Передаточная функция двигателя постоянного тока, найденная по Лапласу, позволяет записать следующие уравнения:

$$U(p) = k_e \Omega(p) + R_{\text{mot}} I(p) + LpI(p); \quad (12)$$

$$J_m p \Omega(p) = k_t I(p) - b \Omega(p). \quad (13)$$

Уравнение переноса этой системы запишем в следующем виде:

$$H(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{k_t}{k_t k_e + (Lp + R_{\text{mot}})(J_m p + b)}, \quad (14)$$

где  $\Omega$  – угловая скорость вращения, рад/с;  $k_e$  – электромагнитная постоянная;  $k_t$  – механический коэффициент.

### Модель системы управления двигателем постоянного тока с ПИД-регулятором

На основе уравнения переноса разработана модель для системы управления на основе ПИД-регулятора для двигателя постоянного тока с нагрузкой для визуализации крутящего момента, тока и скорости управления. Приведем параметры двигателя постоянного тока:  $J_m = 6,5 \cdot 10^{-7}$  кг·м<sup>2</sup>;  $b = 3,59 \cdot 10^{-5}$  кг·м/рад;  $k_e = 1,037 \cdot 10^{-2}$  В·с/рад;  $k_t = 1,037 \cdot 10^{-2}$  Н·м/А;  $R_{\text{mot}} = 0,2$  Ом;  $L = 2 \cdot 10^{-6}$  Гн.

В первой модели управления двигателя постоянного тока с нагрузкой используется ПИД-регулирование с непрерывным временем (рис. 4).

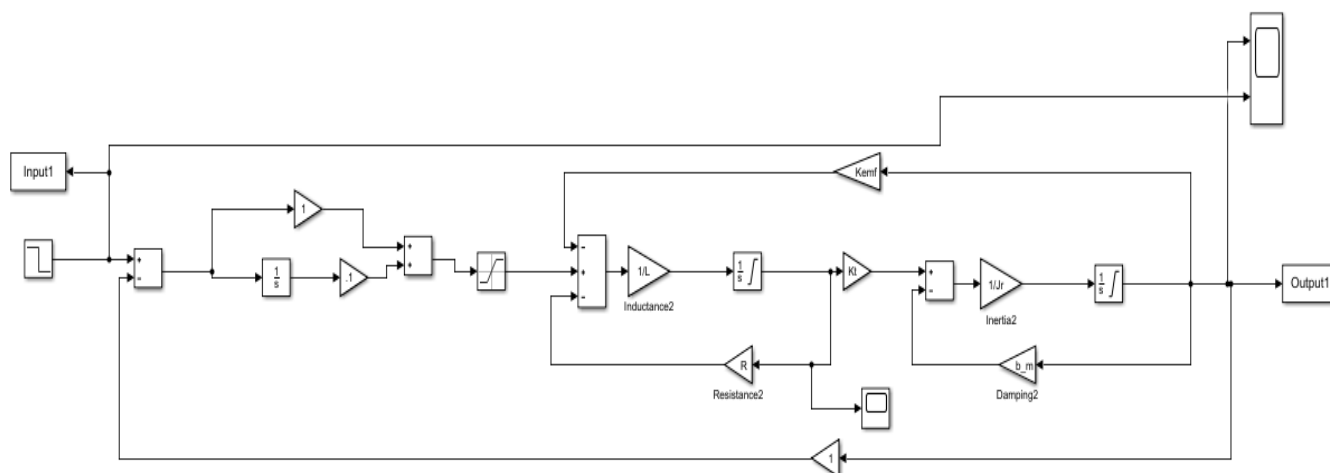
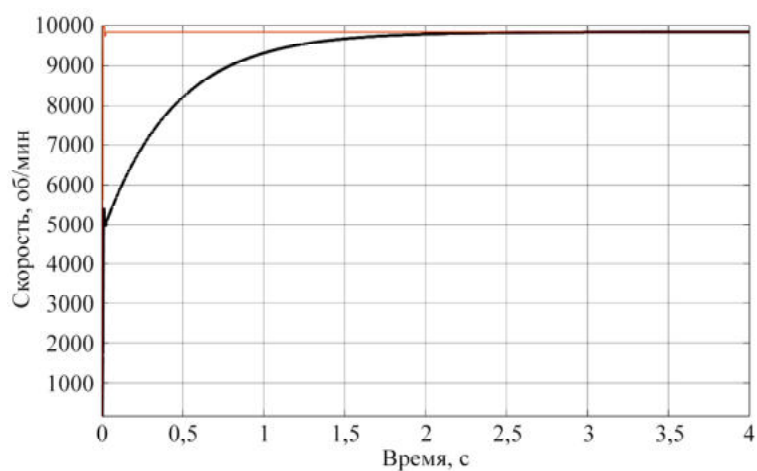


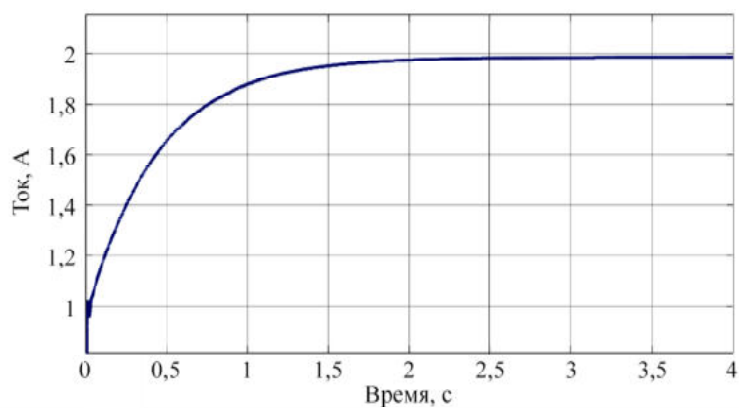
Рис. 4



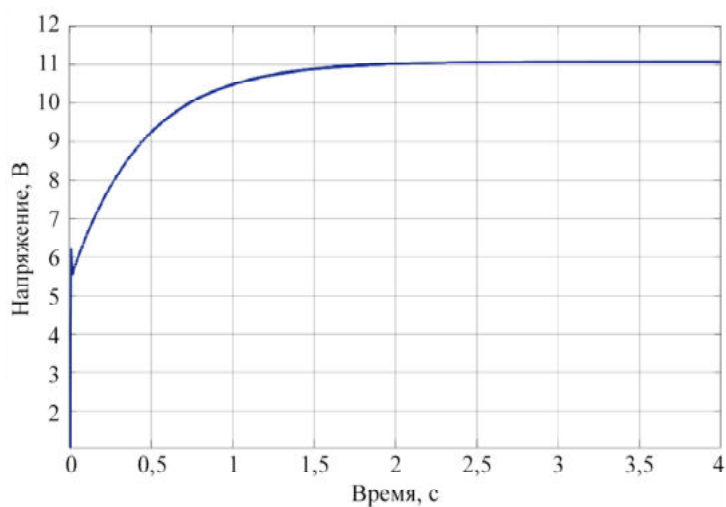
Цель моделирования – определить ток, момент и напряжение, при которых двигатель должен вращаться с той же скоростью, что и эталонный. Другими словами, будет осуществляться поиск параметров ПИД-регулятора  $k_i$ ,  $k_p$ ,  $k_d$ , соответствующих этим результатам. С помощью программы MATLAB/Simulink получены кривые изменения скорости вращения двигателя (рис. 5, а), тока (рис. 5, б), напряжения (рис. 5, в), крутящего момента (рис. 5, г).



а



б



в

Рис. 5 (Начало)

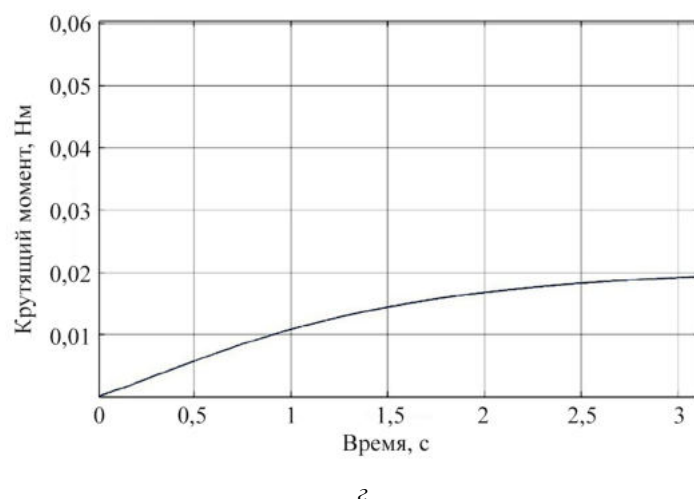


Рис. 5 (Окончание)

По результатам исследования функционирования электропривода (табл. 1) можно проанализировать его работу в различных условиях эксплуатации. По ключевым параметрам (время отклика, ошибка в установившемся режиме, эффективность) проведена углубленная оценка точности системы. В частности, согласно полученным результатам привод поддерживает высокий уровень точности в определенном диапазоне изменения нагрузки, демонстрируя минимальные отклонения от эталонного выходного сигнала. Кроме того, исследование показало, что некоторые внешние факторы (колебания напряжения питания и температуры) оказывают заметное влияние на точность, что требует дальнейших стратегий оптимизации. Эти результаты способствуют лучшему пониманию динамики функционирования электропривода и служат основой для совершенствования алгоритмов управления им с целью повышения надежности и эффективности.

Таблица 1

Параметр	Без регулятора	П-регулятор			И-регулятор		ПИ-регулятор	
Регулирование скорости режимов работы: - $\Delta V$ , об/мин - $\delta_B$ , %	– –	411 5,69	234 3,25	81 1,12	7206 0	7207 0,03	7206 0	7206 0
Оптимальные значения скорости: - $V_{\phi}$ , об/мин - $\Delta V_{\phi}$ , об/мин - $\delta_f$ , %	6153 – 34	62295 977 13,6	66490 557 7,74	7013 193 2,68	0 7206 0,04	0 7207 0,02	– 7207 0	– 7203 4,4
Переходный процесс: - тип переходного процесса $t_{pp}$ - продолжительность $t$ , с	М 5	М 1,6	А 0,35	О 0,3	М 35	О 20	М 2,5	М 0,5
Коэффициенты: - $K_1$ - $K_2$	– –	16,5 0,315	29,8 0,033	87,5 0,011	0,33 0,33	1,65 1,65	3,31 3,31	46 46

**Примечания:**  $\Delta V$ , об/мин – абсолютное отклонение скорости от заданного значения;  $\delta_B$ , % – относительная погрешность скорости;  $V_{\phi}$ , об/мин – базовая скорость вращения двигателя финальная;  $\Delta V_{\phi}$ , об/мин – абсолютное отклонение скорости от финального значения;  $\delta_f$ , % – относительное отклонение частоты вращения во время переходного процесса. Характер и типы переходного процесса обозначены следующим образом: М – монотонный, А – аperiodический; О – колебательный.

В соответствии с графиком (см. рис. 5, а) скорость двигателя в переходном режиме быстро увеличивается от нуля до максимального значения 9860 об/мин за 0,5 с. Затем, когда скорость стабилизируется, достигается установившееся значение 9860 об/мин. Таким образом, можно сделать вывод о том, что при регулировании в разомкнутом контуре частота вращения двигателя следует за опорной частотой вращения. Кривая напряжения достигает требуемого значения при запуске, наблюдается превышение

по току при запуске со временем реакции 0,05 с. После этого напряжение падает до номинального значения, соответствующего опорной скорости вращения 9860 об/мин на уровне 11,1 В (см. рис. 5, а).

Кривая крутящего момента показывает, что в интервале 0...1 с, который соответствует переходному режиму, электромагнитный крутящий момент очень быстро увеличивается от нуля до 0,02 Н·м. Этот момент необходим для привода ротора, находящегося в состоянии покоя. Затем он стабилизируется до низкого значения, близкого к нулю (до 0,02 Н·м). Это связано с тем, что двигатель работает на холостом ходу и находится в устойчивом состоянии в интервале 1...100 с. К концу данного интервала крутящий момент двигателя становится постоянным (см. рис. 5, з).

Потребляемый двигателем ток при применении ПИД-регулятора демонстрирует аналогичную динамику изменения, что и крутящий момент двигателя. ПИД-регулятор регулирует ток до достижения определенного заданного значения, что напрямую влияет на крутящий момент двигателя и, следовательно, на его потребляемый ток, причем как в переходном, так и в установившемся режиме во время работы на холостом ходу, а также во время работы под нагрузкой. Это связано с тем, что от источника напряжения (батареи), который питает его, двигатель потребляет ток, необходимый для создания крутящего момента.

Результаты, приведенные в табл. 2 и на рис. 5, представляют собой сравнительный анализ характеристик электропривода.

Таблица 2

Момент, 5 Н·м	Регулирование скорости режимы работы			Оптимальные значения скорости			Переходный процесс	
	$B$ , об/мин	$\Delta V$ , об/мин	$\delta_B$ , %	$B_{\Phi}$ , об/мин	$\Delta V_{\Phi}$ , об/мин	$\delta_{\Phi}$ , %	Тип переходного процесса $t_{pp}$	Продолжи- тельность $t$ , с
Статический	–	7208	1,5	0	7206	1,7	A	0,03
Динамический	–	7205	1,5	0	7194	11,0	A	0,03

Табл. 1 иллюстрирует показатели точности в установившемся режиме (время отклика, ошибка в установившемся режиме, эффективность). Видно, что привод сохраняет высокую точность при определенных диапазонах нагрузки, но внешние факторы (напряжение, температура) влияют на его производительность. На рис. 5, напротив, показаны динамические кривые скорости, тока, напряжения, крутящего момента. Эти графики демонстрируют быструю реакцию привода на переходном этапе с быстрым увеличением напряжения, тока и крутящего момента для преодоления начального сопротивления. После выхода на устойчивый режим напряжение и ток стабилизируются, а крутящий момент уменьшается. По результатам выявлены области для потенциальной оптимизации с целью повышения общей надежности и эффективности привода.

### Simulink-моделирование квадрокоптера с ПИД-регулятором

После моделирования системы управления двигателем с ПИД-регулятором и получения кривых крутящего момента, тока и напряжения переходим к этапу моделирования квадрокоптера с использованием ПИД-регулятора для проверки разработанной модели. Для этого предложено использовать уравнения угловых ускорений  $\ddot{\theta}$ ,  $\ddot{\psi}$ ,  $\ddot{\phi}$ ,  $\ddot{z}$ , чтобы определить взаимосвязь между моментами различных двигателей и угловыми ускорениями для создания модели в Simulink (рис. 6).

ПИД-регулирование всегда остается простым в реализации и очень эффективным действием для такой нелинейной системы, как квадрокоптер, когда начальные условия отличаются, невозможно стабилизировать систему, т. е. состояния тангажа, крена, рысканья имеют значительное отклонение от устойчивого «нулевого» состояния. В связи с этим сначала необходимо привести квадрокоптер в устойчивое и сбалансированное состояние. Формула, определяющая закон управления для ПИД-регулятора, описывается следующим образом [5]:

$$U(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) + k_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (15)$$

где  $U$  – управляемая выходная переменная;  $e$  – ошибка между заданием  $r$  и фактическим перемещением по  $Y$ .

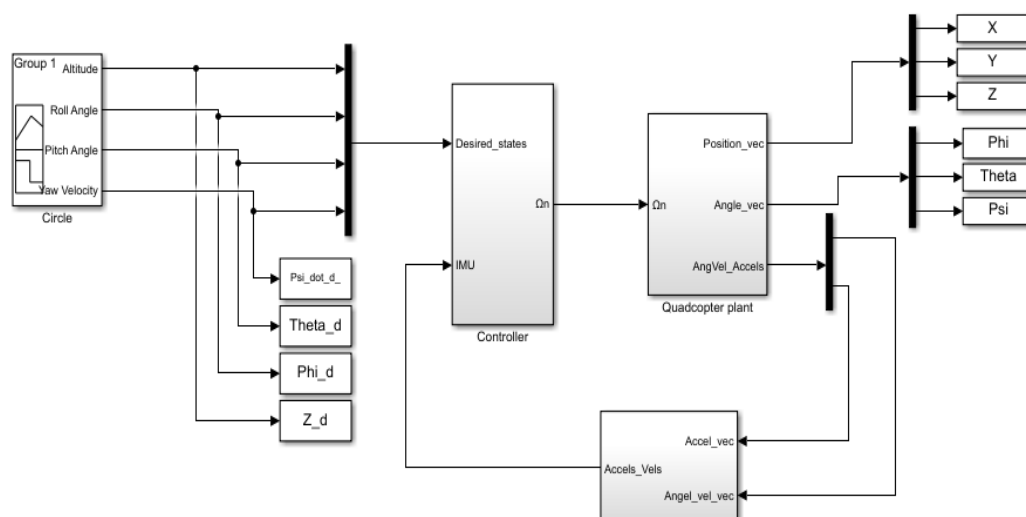


Рис. 6

На рис. 7 показаны блоки ПИД-регуляторов для  $\phi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ ,  $Z$ .

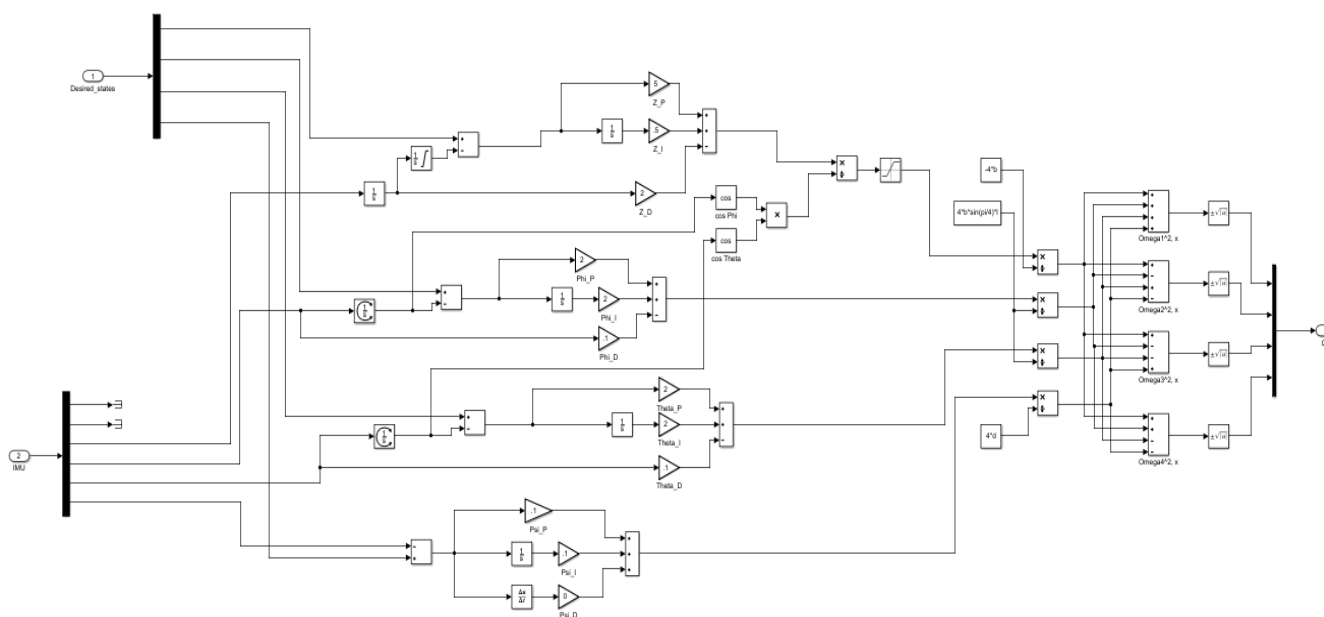


Рис. 7

Модель системы управления электродвигателями квадрокоптера представлена на рис. 8.

Квадриротор – это система, которая использует четыре входа для управления шестью выходами и шестью степенями свободы. К системе подключен внутренний контур, который регулирует движения вращения по тангажу и рысканию и должен быть быстрее, чем второй внешний контур, который регулирует движения перевода.

Приведем характеристики квадрокоптера:  $m = 2$  кг;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;  $l = 24 \cdot 10^{-2}$  м;  $I_{\text{rotor}} = 6,5 \cdot 10^{-7}$  кг·м<sup>2</sup>;  $I_X = 8 \cdot 10^{-3}$  кг·м<sup>2</sup>;  $I_Y = 8 \cdot 10^{-3}$  кг·м<sup>2</sup>;  $I_Z = 1,68 \cdot 10^{-2}$  кг·м<sup>2</sup>;  $d = 2,02 \cdot 10^{-6}$  Н·м·с<sup>2</sup>.

После нескольких симуляций определяются наилучшие значения коэффициентов, определенных для рысканья, тангажа, крена и высоты  $Z$ .

После завершения моделирования проводятся испытания (методом проб и ошибок) для определения коэффициентов ПИД-регулятора.

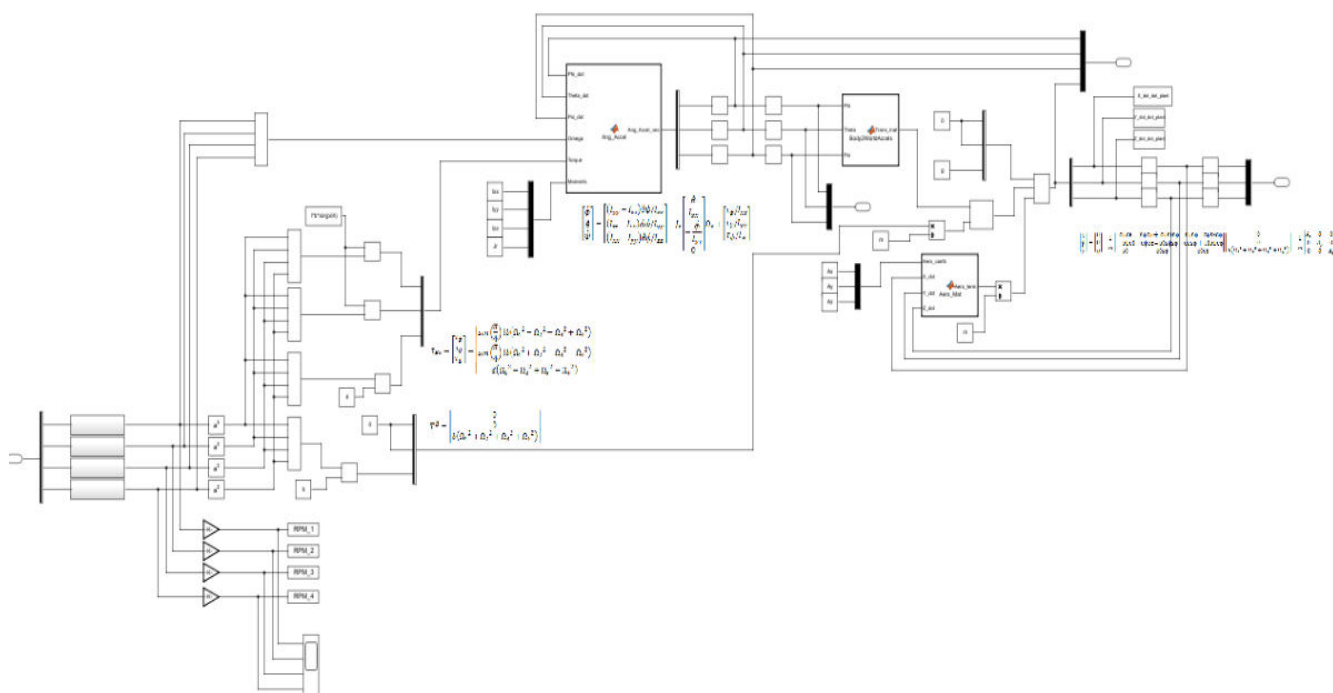


Рис. 8

В табл. 3 приведена сводка значений ПИД-регулятора.

Таблица 3

ПИД	$\varphi$	$\theta$	$\psi$	$Z$
$k_p$	0,01	0,01	0,01	0,01
$k_i$	0,005	0,005	0,005	0,5
$k_d$	0,8	0,8	0,8	0,8

На рис. 9 показан переходный режим с дальнейшим переходом в установившийся. Несмотря на изменение коэффициентов, которое может рассматриваться как возмущение, измеренные значения остаются в соответствии с расчетными. Квадрокоптер стабилизируется по траекториям, но его статическая ошибка не равна нулю. Согласно результатам расчетов в Matlab/Simulink ПИД-регулятор обеспечивает хорошую реакцию и удовлетворительный результат, особенно в плане уменьшения смещения между данными процесса и целевым значением. Настройки ПИД-регулятора были выбраны правильно, а стабильность гарантируется работой этого регулятора.

Приведем результаты моделирования работы ПИД-регулятора. На рис. 9 представлены результаты моделирования по  $Z$  с помощью ПИД-регулятора, рис. 10 демонстрирует контроль тангажа с помощью ПИД-регулятора, рис. 11 – контроль крена с помощью ПИД-регулятора, рис. 12 – скорость вращения двигателя с помощью ПИД-регулятора.

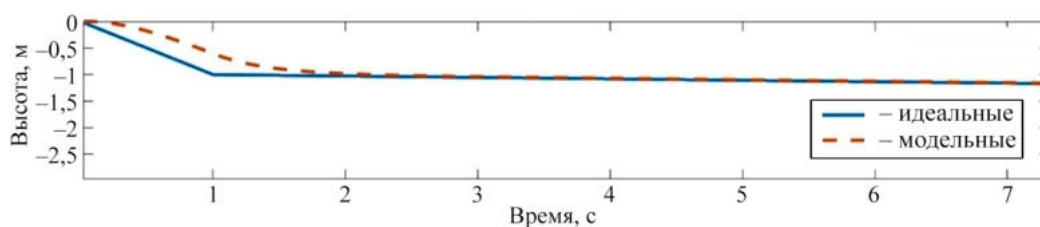


Рис. 9

На начальном этапе управления высотой наблюдается переходной отклик системы, после которого она выходит на устойчивое состояние, несмотря на изменения в управляющих командах. Имеется нену-

левая статическая ошибка. Управление по каналам крена и тангажа характеризуется переходным динамическим поведением, за которым следует устойчивое состояние, что свидетельствует о способности ПИД-регулятора справляться с возмущениями. Параметры настройки ПИД-регулятора оказались оптимально подобранными, что подтверждено устойчивостью динамических характеристик во всех режимах управления.

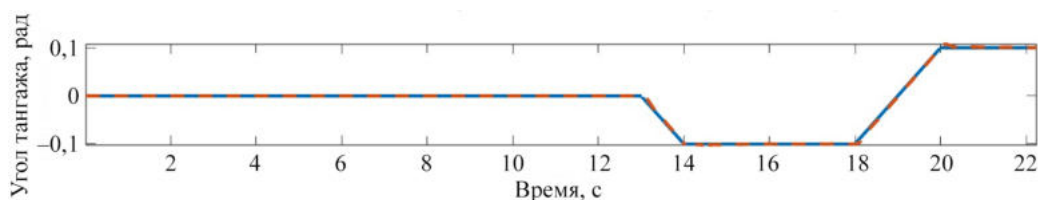


Рис. 10

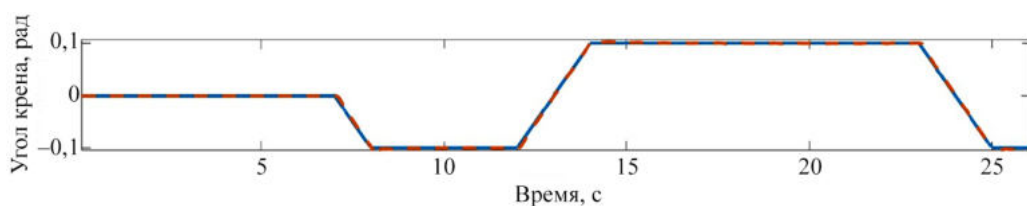


Рис. 11

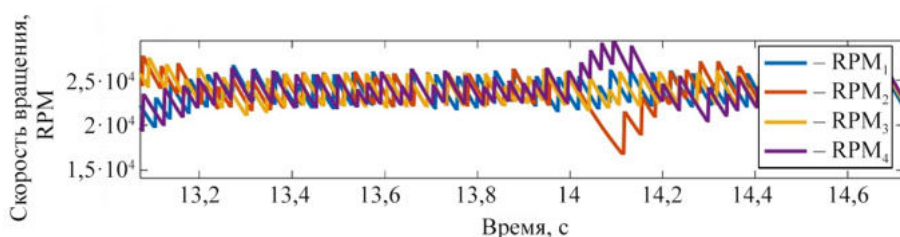


Рис. 12

Аналогичным образом можно настроить блоки контроллера и датчиков. После завершения настройки можно провести моделирование системы.

Имитация полета модели квадрокоптера по кругу представлена на рис. 13.

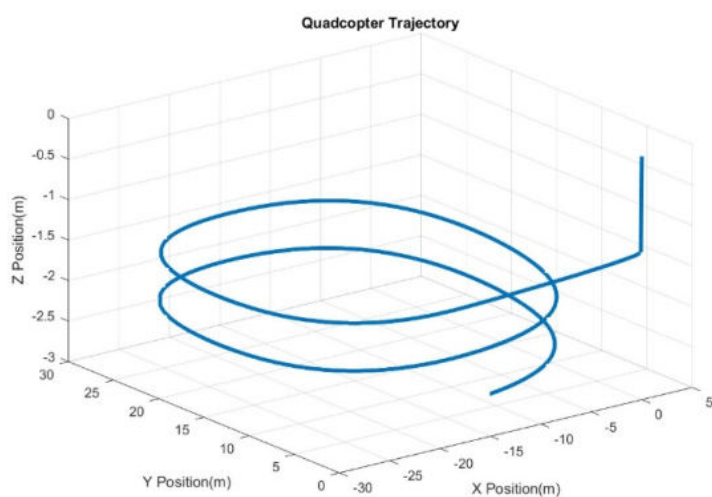


Рис. 13

Таким образом, разработанная комплексная методика управления, предназначенная для БЛА, сочетает простоту и эффективность ПИД-регуляторов. Методика базируется на теоретических положениях

механики Ньютона – Эйлера и фундаментальных динамических принципах. Проведенное моделирование продемонстрировало удовлетворительные результаты, открывающие перспективу дальнейших исследований, предусматривающих внедрение более сложных алгоритмов управления, ориентированных на улучшение показателей надежности и адаптивности.

Представлены теоретические положения для построения динамической модели квадрокоптера, реализуемые несколькими уравнениями. Во второй части уравнений модели Ньютона – Эйлера создана модель для визуализации крутящего момента, тока и скорости управления при манипулировании системой двигателей постоянного тока квадрокоптера с помощью ПИД-регулятора. Подробно описаны различные этапы моделирования квадрокоптера с помощью MATLAB/Simulink. С учетом расположения различных частей ПИД-регулятора и скользящего режима описана структура алгоритма управления.

Для проверки динамики и контроллеров было использовано моделирование в MATLAB, при этом необходимо было определить физические константы, используемые в модели. При применении ПИД-регулятора были получены лучшие результаты как в регулировании, так и в отслеживании. Таким образом, в дальнейшем будут использоваться более надежные методы управления для явного учета надежности при проектировании.

В дальнейшем работа должна быть направлена на интеграцию передовых методов искусственного интеллекта – нечеткой логики и нейронных сетей – для устранения нелинейности и неопределенности, присущих системам квадрокоптеров. Кроме того, изучение альтернативных платформ моделирования может дать более глубокое представление об оптимальных стратегиях управления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сигалос А. и др. Разработка контроллера полета и периферийных устройств для квадрокоптера // Международный журнал прикладных наук и технологий. 2019. № 4. С. 463–470.
2. Мусеев В.С., Гуцина Д.С., Мусеев Г.В. Основы теории создания и применения информационных беспилотных авиационных комплексов. Казань: Школа, 2010. 189 с.
3. Elmeseiry N., Alshaer N., Ismail T. A Detailed Survey and Future Directions of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with Potential Applications // Aerospace. 2021. № 8 (12). Article № 363.
4. Keda T. et al. Wall Contact by Octo-Rotor UAV with One DOF Manipulator for Bridge Inspection // Proc. of the International Conference on Intelligent Robots and Systems, Sept. 24–28, 2017, Vancouver, Canada. Article № 2153-0866.
5. Trenev I.S., Tkachenko A.A., Kustov A.Yu. Movement Stabilization of the Parrot Mambo Quadcopter along a Given Trajectory Based on PID Controllers // IFAC-PapersOnLine. 2021. Vol. 54. № 13. P. 227–232.
6. Федотов В.В., Рожков В.В. Моделирование позиционной системы электропривода по схеме «Широтно-импульсный преобразователь – двигатель постоянного тока» // Энергетика, информатика, инновации – 2022 (электроэнергетика, электротехника и теплоэнергетика, математическое моделирование и информационные технологии в производстве): Сб. тр. 12-й Междунар. науч.-техн. конф., г. Смоленск, 23 нояб. 2022. Смоленск: Универсум, 2022. Т. 1. Р. 139–142.
7. Федотов В.В. Решение характеристического уравнения замкнутой системы электропривода Тр. 20-й Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, г. Смоленск, 26–27 апр. 2023. Смоленск: Универсум, 2023. Р. 224–228.
8. Хмет Сое Паинги и др. Контроль высоты и управление траекторным движением автономного миниатюрного летательного аппарата // Моделирование, оптимизация и информационные технологии [Электронный журнал]. 2021. № 9. URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=933> (дата обращения: 15.03.2025).
9. Mac T.T. et al. The Development of an Autonomous Navigation System with Optimal Control of an UAV in Partly Unknown Indoor Environment // Mechatronics. 2018. № 49. P. 187–196.
10. Vasichenko A. UAV Mathematical Modeling Using Differential Equations // Материалы 5-го Междунар. семинара по информационным, вычислительным и управляющим системам для распределенные сред, г. Иркутск, 3–7 июля 2023, Россия. Иркутск: Изд-во ИДСТУ СО РАН, 2023. С. 124–126.
11. Idrissi M., Salami M., Annaz F. A Review of Quadrotor Unmanned Aerial Vehicles: Applications, Architectural Design and Control Algorithms // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2022. Vol. 104. Article № 22.
12. Prakosa J.A. Speed Control of Brushless DC Motor for Quad Copter Drone Ground Test // Proc. of the IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, Jan. 28–31, 2019, Saint Petersburg, Moscow, Russia. P. 644–648.

Поступила в редколлегия 15.04.25

# MATHEMATICAL MODEL OF CONTROL OF UNMANNED AIRCRAFT BASED ON PID REGULATOR

**V.G. Makarov, G.V. Vagapov, and N. Nesrine**

This work is devoted to the development and evaluation of a control method using PID-regulator, supplemented with operational amplifiers, to improve the speed and torque control in electric drives of UAV. We develop a dynamic Newton-Euler quadcopter model and analyze the stability of linear and non-linear control methods based on PID regulator, using the Lyapunov theorem. We also use the ideas of mathematical modeling of electric drives, with a special focus on integrating operational amplifiers. The proposed management strategies are validated on simulation models and demonstrate reliable performance.

**Keywords:** unmanned aircraft, DC motor, speed and time control, operating modes, PID-regulator, electric drive group.

---

**Макаров Валерий Геннадьевич** – д-р техн. наук (КНИТУ, Казань)

E-mail: vg\_makarov@mail.ru

**Вагапов Георгий Валериянович** – д-р техн. наук (КГЭУ, Казань)

E-mail: vagapov@list.ru

**Несрин Неджари** – магистр (КНИТУ, Казань)

E-mail: nessrine.nora2013@gmail.com



# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВАРИАБЕЛЬНОСТИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ПО ЭЛЕКТРОКАРДИОСИГНАЛУ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ И АДАПТАЦИОННЫХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА

С.С. Седов, Т.Ф. Щербакова, Р.И. Шарипов

Исследуются параметры вариабельности сердечного ритма по электрокардиосигналу. Показано, что после физической нагрузки индекс напряженности значительно возрастает, а параметр RMSSD, отражающий колебания длительности RR-интервалов, снижается. Величина изменения параметров свидетельствует об адаптационных возможностях испытуемых к воздействию нагрузки.

**Ключевые слова:** электрокардиосигнал, вариабельность сердечного ритма, кардиоинтервалограмма, индекс напряженности.

Широкий круг людей во время выполнения профессиональных обязанностей подвергается стрессовым воздействиям в виде разнообразных нагрузок, физических и эмоциональных, которые могут варьироваться в широком диапазоне как по длительности, так и по интенсивности. В результате такого воздействия состояние организма может ухудшиться вплоть до наступления смерти в отдельных случаях. Особенно критичны такие воздействия в плане возможных негативных последствий для авиационных диспетчеров, водителей транспортных средств, спортсменов и т. д. Однако организм человека может проявлять устойчивость и сопротивляться воздействию стрессовых факторов, а также адаптироваться к ним. Существуют объективные параметры, позволяющие оценить функциональное состояние организма и его адаптационные возможности к такого рода воздействиям. Эти параметры вычисляются на основе вариабельности сердечного ритма.

Анализ вариабельности сердечного ритма начал активно развиваться в СССР с середины 1960-х гг. [1, 2]. Работа [1] является фундаментальной в области исследований вариабельности сердечного ритма. Представленные в ней подходы и методы, параметры вариабельности сердечного ритма и диапазоны их значений в норме являются актуальными и в настоящее время. Сфера применения анализа вариабельности сердечного ритма постоянно расширяется. В современных работах [2–4] проводится анализ вариабельности сердечного ритма с целью его практического применения. В работе [2] отмечается, что анализ вариабельности сердечного ритма актуален для ранней диагностики сердечно-сосудистых заболеваний, а также перенапряжения при физических нагрузках.

Метод анализа вариабельности сердечного ритма основан на распознавании R-зубцов электрокардиосигнала и измерении временных интервалов между соседними R-зубцами (RR-интервалы). Эти интервалы интерпретируются как временные интервалы между двумя соседними биениями сердца. Далее строятся динамические ряды RR-интервалов – кардиоинтервалограмма – и проводится анализ кривой кардиоинтервалограммы различными математическими методами. По кардиоинтервалограмме можно вычислить ряд параметров вариабельности сердечного ритма на основе статистических, геометрических, корреляционных и спектральных методов [1–4].

Целью работы является количественная оценка возможностей организма человека выдерживать физическую нагрузку по параметрам вариабельности сердечного ритма.

В работе используем два наиболее широко распространенных параметра – RMSSD и индекс напряженности (стресс-индекс). Первый параметр – это среднеквадратическая величина разности величин последовательных пар RR-интервалов, мс:

$$\text{RMSSD} = \sqrt{n \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (\text{RR}_{i+1} - \text{RR}_i)^2}, \quad (1)$$

применяющийся для непосредственной количественной оценки вариабельности сердечного ритма и отражающий активность парасимпатического отдела вегетативной нервной системы. Чем выше значение

данного показателя, тем активнее звено парасимпатической регуляции (выше восстановительные функции организма после нагрузки). После воздействия нагрузки на организм человека значение параметра снижается. В норме диапазон значений среднеквадратической величины составляет 20...50 мс [1].

Второй параметр – индекс напряженности (стресс-индекс SI) – является главным показателем активности симпатической нервной системы. Он вычисляется на основе гистограммы для ряда RR-интервалов и составляет в норме 50–180 у. е. [1]:

$$SI = \frac{AMo}{IMo\Delta RR}, \quad (2)$$

где  $AMo$  – амплитуда моды гистограммы, %, по отношению к объему выборки;  $Mo$  – среднее значение моды, с;  $\Delta RR = RR_{\max} - RR_{\min}$  – вариационный размах, с.

После нагрузки этот показатель, чрезвычайно чувствительный к усилению тонуса симпатической нервной системы, увеличивается. Небольшая нагрузка (физическая или эмоциональная) увеличивает индекс напряженности в 1,5–2 раза. При значительных нагрузках он увеличивается в пять и более раз [1, 3]. Для вычисления данных параметров требуется пятиминутная запись электрокардиосигнала.

Индекс напряженности и среднеквадратическая величина выбраны потому, что они хорошо дополняют друг друга, отражая активность симпатического и парасимпатического отделов нервной системы, и, таким образом, позволяют надежно и объективно оценивать состояние организма и возможности его адаптации к стрессовым воздействиям. Кроме того, сложность вычисления данных параметров невелика.

Регистрация электрокардиосигнала осуществлялась по стандартному отведению I с помощью портативного одноканального кардиографа, экспериментальный образец которого разработан и создан в КНИТУ-КАИ (Казань) [5, 6]. Электрокардиосигнал регистрировался с поверхности запястий рук испытуемого в течение 5 мин в покое. После предварительной обработки в кардиографе сигнал записывался в память компьютера в виде файла и вычислялась среднеквадратическая величина и индекс напряженности этого сигнала на основе программы, созданной в среде MATLAB. Затем каждый испытуемый подвергался одной и той же физической нагрузке в быстром темпе (10 отжиманий и 20 приседаний). После этого повторно регистрировался электрокардиосигнал и вычислялись среднеквадратическая величина и индекс напряженности после нагрузки. Всего получено двенадцать записей электрокардиосигнала в покое и соответствующие им двенадцать записей после физической нагрузки под кодовыми номерами A1; A2; ... A12.

Значения индекса напряженности и среднеквадратической величины в покое и после нагрузки, а также их изменение для каждого испытуемого A1...A12 приведены в таблице.

Кодовый номер	Индекс напряженности в покое, у.е.	Индекс напряженности после нагрузки, у.е.	Средне-квадратическая величина в покое, мс	Средне-квадратическая величина после нагрузки, мс	Разница по индексу напряженности, у.е.	Разница по средне-квадратической величине, мс
A1	92,8	182	35,4	24,1	89,2	11,3
A2	126	180	19,1	23,4	54,0	–4,30
A3	165	222	40,0	14,3	57,0	25,7
A4	73,3	102	52,9	61,1	28,7	–8,20
A5	130	582	30,2	20,4	452	9,80
A6	53,1	124	45,0	35,6	70,9	9,40
A7	90,3	152	42,1	23,4	61,7	18,7
A8	108	327	26,4	19,4	219	7,00
A9	127	209	21,0	19,1	82,0	1,90
A10	165	494	35,1	9,30	329	25,8
A11	59,0	173	45,7	32,4	114	13,3
A12	117	261	30,8	33,2	144	–2,40

Согласно приведенным данным (см. таблицу) реакция каждого испытуемого на одну и ту же нагрузку, т. е. изменение значений параметров, различна и строго индивидуальна. Индекс напряженности в покое был в норме во всех случаях (меньше 180) и существенно возрастал после физической

нагрузки также во всех случаях. В восьми случаях из двенадцати значение индекса напряженности превысило верхний порог нормы – 180. В четырех случаях (А3, А8, А9, А12) значение индекса напряженности после нагрузки превысило 200, что свидетельствует о наличии компенсированного дистресса, т. е. стресса, приводящего к ухудшению адаптационно-резервных возможностей организма [7].

В случаях А5, А10 значения индекса напряженности превысили 350, что говорит о наличии дистресса [8]. У всех испытуемых в покое, кроме А4, значения среднеквадратической величины в покое и после нагрузки были в пределах нормы. В целом наблюдалось снижение значений среднеквадратической величины после физической нагрузки, однако в случаях А2, А4, А12 зафиксировано некоторое повышение параметра после нагрузки.

Приведем пример гистограмм для вычисления индекса напряженности по кардиоинтервалограмме у испытуемого А7. Гистограмма для электрокардиосигнала в покое (рис. 1) имеет значительно большую дисперсию, чем гистограмма после нагрузки (рис. 2), соответственно, наблюдается существенное различие значений индекса напряженности.

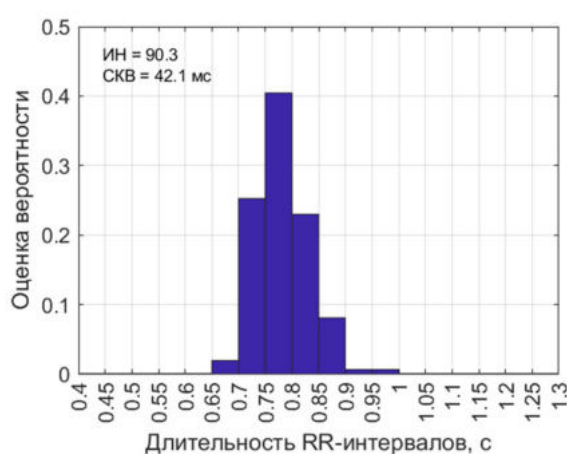


Рис. 1

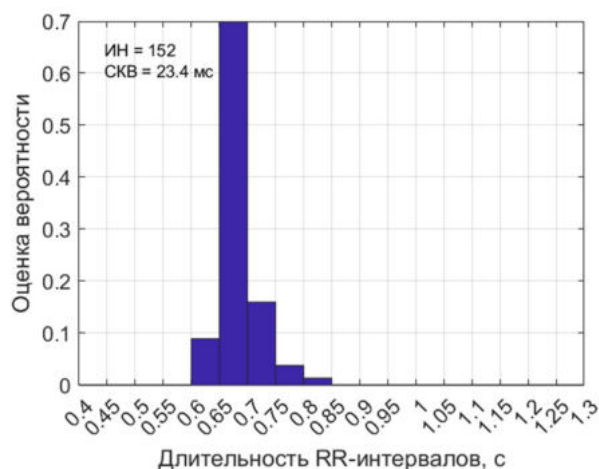


Рис. 2

Можно сделать вывод о том, что значения исследуемых параметров строго индивидуально изменяются для каждого испытуемого, в соответствии с возможностями его организма. Если параметры изменяются в пределах нормы (например для А6, А7), это означает, что данные испытуемые достаточно адаптированы к физической нагрузке и могут ее выдерживать без наступления состояния дистресса. Когда значения параметров существенно выходят за пределы нормы (например, А5, А8, А10), это означает, что данная физическая нагрузка вызвала состояние дистресса, и у организма не хватает ресурсов для длительного ее выдерживания. В этом случае нагрузку следует немедленно отменить.

Весьма перспективно применение данных параметров variability сердечного ритма для спортсменов во время и после тренировки, а также для водителей транспортных средств. Для спортсменов особенно важен индекс напряженности, поскольку они могут испытывать как длительную нагрузку, так и интенсивную нагрузку в течение коротких интервалов времени. В связи с этим важно следить за его величиной во время тренировки в реальном масштабе времени. Если индекс напряженности выше 180, то он вышел за пределы нормы, следовательно, спортсмен испытывает стресс. Если индекс напряженности выше 350, тренировку надо прекращать.

Для водителей транспортных средств целесообразно измерять параметры variability сердечного ритма перед рейсом (они должны быть в пределах нормы) и затем во время рейса, особенно после каких-либо нештатных ситуаций, когда водитель остановил транспортное средство. Если параметры variability сердечного ритма в данный момент находятся за пределами нормы, то водитель не должен начинать движение до тех пор, пока показатели variability сердечного ритма не придут в норму.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Баевский Р.М. и др.* Анализ variability сердечного ритма при использовании различных электрокардиографических систем // Вестник аритмологии. 2001. № 24. С. 65–86.
2. *Новиков А.А., Смоленский А.В., Михайлова А.В.* Подходы к оценке показателей variability сердечного ритма (обзор литературы) // Вестник новых медицинских технологий [Электронный журнал]. 2023. № 3. URL: <http://www.medtsu.tula.ru/VNMT/Bulletin/E2023-3/3-3.pdf> (дата обращения: 27.04.2025).
3. *Шлык Н.И.* Variability сердечного ритма и методы ее определения у спортсменов в тренировочном процессе. Ижевск: Удмуртский ун-т, 2022. 81 с.
4. *Негуляев В.О. и др.* Сравнение результатов оценки variability сердечного ритма по данным регистрации ЭКГ и артериального давления // Физиология человека. 2018. № 3. С. 82–89.
5. *Korobkov A.A., Ulanov A.V.* A Portable Device for Registration and Transfer of Patient's Electrocardiogram Using Microwave Technologies // Proc. of the International Conference on Antenna Theory and Techniques, April 21–24, 2015, Kharkiv, Ukraine. С. 1–2.
6. *Уланов А.В., Коробков А.А.* Разработка портативного устройства регистрации электрокардиосигнала человека // Поиск эффективных решений в процессе создания и реализации научных разработок в российской авиационной и ракетно-космической промышленности: Сб. докл. междунар. науч.-практ. конф. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2014. Т. 4. С. 203–204.
7. *Биндусов Е.Е., Овсянникова М.А., Зверева З.Ф.* Анализ индекса напряжения Баевского при различной двигательной активности на занятиях физической культурой в вузе // Педагогический журнал. 2021. № 5-1. С. 659–664.
8. *Аникина О.В., Гуржин С.Г., Шуляков А.В.* Оперативное оценивание уровня стресса в магнитотерапии на основе вариационной пульсометрии: Сб. тр. 6-го Междунар. науч.-техн. форума. Рязань: РГРТУ, 2023. Т. 6. С. 165–170.

Поступила в редколлегию 27.05.25

## DETERMINATION OF HEART RATE VARIABILITY PARAMETERS USING AN ELECTROCARDIAC SIGNAL TO ASSESS THE STATE AND ADAPTIVE CAPABILITIES OF THE HUMAN BODY

**S.S. Sedov, T.F. Shcherbakova, and R.I. Sharipov**

The paper examines the parameters of heart rate variability using electrocardiosignal data. It was shown that after physical activity the stress index significantly increases, and the so-called RMSSD, reflecting fluctuations in the duration of RR intervals, decreases. The magnitude of the change in heart rate variability parameters indicates the adaptive capabilities of the subjects to the effects of physical activity.

**Keywords:** electrocardiosignal, heart rate variability, cardiointervalogram, stress index.

---

**Седов Станислав Сергеевич** – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: s.sedov@gmail.com

**Щербакова Татьяна Филипповна** – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: TFScherbakova@kai.ru

**Шарипов Рузиль Илдарович** – студент (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: Ruzil.sharipov2016@mail.ru

# **СТРУКТУРНАЯ СХЕМА, МОДЕЛИ ОПЕРАТОРНЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЕЙ И ДИНАМИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ КАНАЛОВ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ФЮЗЕЛЯЖНЫМ ПРИЕМНИКОМ ПАРАМЕТРОВ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА**

**В.М. Солдаткин, В.В. Солдаткин, Е.С. Ефремова,  
Р.В. Козловский, Г.В. Козловский**

Отмечена важность достоверной информации о воздушных параметрах движения относительно окружающей среды для решения задач управления и обеспечения безопасности полета летательного аппарата. Указаны ограничения традиционных для авиации систем измерения воздушных параметров движения летательного аппарата с распределенными по фюзеляжу и выступающими в набегающий воздушный поток приемниками и датчиками параметров набегающего потока, связанных с бортовым вычислителем. Это определяет перспективность разработки рассматриваемой системы с неподвижным невыступающим фюзеляжным приемником набегающего потока и встроенным вычислителем. С использованием опубликованных ранее конструктивной схемы и модели определения воздушных параметров движения летательного аппарата разработаны структурная схема, модели операторных чувствительностей и динамических погрешностей измерительных каналов рассматриваемой системы при детерминированных и случайных воздействиях, позволяющие решать задачи анализа и синтеза динамических погрешностей измерительных каналов системы.

**Ключевые слова:** летательный аппарат, движение, воздушные параметры, измерение, фюзеляжный приемник, динамические погрешности, модели.

При пилотировании, автоматическом управлении и обеспечении безопасности движения самолета, малоразмерных летательных аппаратов различного класса и назначения в пределах атмосферы необходима достоверная информация о воздушных параметрах движения относительно окружающей среды [1–3]. Значительное число автономных приемников и датчиков параметров набегающего воздушного потока, распределенных по фюзеляжу и связанных пневмопроводами и электрическими кабелями с бортовым вычислителем традиционной системы измерения воздушных параметров движения, широко используемой на самолетах, усложняет конструкцию, увеличивает массу, стоимость и заметность траектории движения в атмосфере, что ограничивает ее применение на малоразмерных пилотируемых, беспилотных и дистанционно пилотируемых летательных аппаратах. Это определяет перспективность разработки рассматриваемой в работах [4, 5] системы измерения воздушных параметров движения летательных аппаратов с одним неподвижным невыступающим (фюзеляжным) приемником параметров набегающего воздушного потока и со встроенным вычислителем, формирующим выходные сигналы системы, как правило, в цифровой форме. Особенности построения, конструктивная схема, модели алгоритмов обработки и определения воздушных параметров движения летательного аппарата рассматриваемой системы рассматриваются в работах [4, 5]. В работе [6] приведены источники и причины, модели методических и инструментальных погрешностей измерительных каналов рассматриваемой системы, отмечается, что погрешности каналов по величине соответствуют погрешностям традиционной для самолетов системы. При решении задач автоматического управления малоразмерных летательных аппаратов различного класса и назначения важное значение имеют динамические характеристики и погрешности измерительных каналов рассматриваемой системы измерения воздушных параметров движения летательного аппарата с одним (интегрированным) неподвижным фюзеляжным приемником параметров набегающего потока, результаты исследования которых приводятся далее.

Как показано в работе [4], конструктивная схема интегрированного неподвижного фюзеляжного приемника параметров набегающего воздушного потока имеет вид, приведенный на рис. 1.

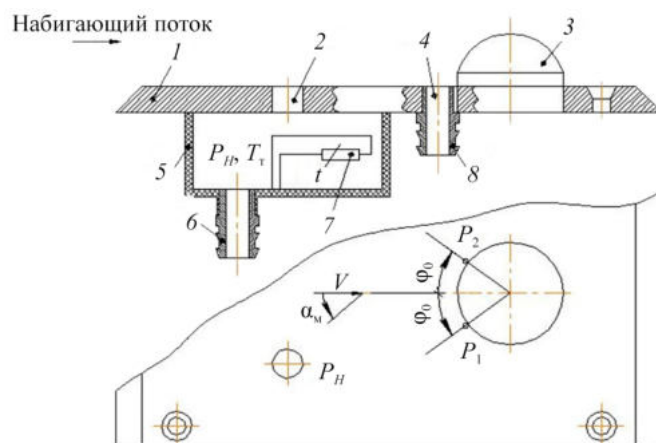


Рис. 1

Интегрированный фюзеляжный приемник параметров набегающего потока выполнен на основе широко используемого на самолетах фюзеляжного приемника статического давления с аэродинамическим компенсатором погрешности восприятия статического давления невозмущенного набегающего потока, обусловленной движением летательного аппарата и обтеканием его фюзеляжа с приемником [7]. Для получения дополнительной информации о параметрах набегающего воздушного потока на поверхности плиты 1 фюзеляжного приемника с отверстием 2 приемника статического давления  $P_H$  предложено [8] у основания аэродинамического компенсатора 3 под углом  $\varphi_0$  к оси фюзеляжного приемника расположить два отверстия 4 для восприятия давлений  $P_1, P_2$ . Для снижения возможных пульсаций давления  $P_H$  отверстие соединено с термоизолированной глухой камерой 5 с давлением  $P_{гк}$ , которая через штуцер 6 соединена с каналом преобразования и обработки системы. В камере установлен проводниковый терморезистор 7, регистрирующий температуру  $T_t$  заторможенного набегающего потока. Терморезистор подключен к измерительной схеме (ИС), выходной электрический сигнал ИС подается на вход встроенного вычислителя, который по известной модели вычисляет температуру  $T_H$  наружного воздуха. Камера, давление  $P_{гк}$  в которой равно сглаженному от пульсаций статическому давлению  $P_H$ , через штуцер 6 соединена со входом датчика абсолютного давления ДАД, а также со входами двух датчиков перепада давлений ДПД1 и ДПД2, другие входы которых через штуцер 8 соединены с отверстием 4 для восприятия давлений  $P_1$  и  $P_2$ . Датчики ДАД, ДРД1 и ДПД2 преобразуют давление  $P_H$  и разности  $\Delta P_1 = P_1 - P_H$  и  $\Delta P_2 = P_2 - P_H$  в электрические сигналы, которые подаются на входы вычислителя. В вычислителе проводится аналого-цифровое преобразование и обработка выходных сигналов измерительной схемы, датчиков ДАД и ДПД и определение воздушных параметров движения системы в соответствии с моделями, полученными в работе [4], вида

$$\alpha_m = \frac{1}{2} \arcsin \frac{\eta}{2} \frac{\Delta P_1 - \Delta P_2}{|\Delta P_1 + \Delta P_2|}; \quad (1)$$

$$V_B = \frac{P_0 T_t}{\eta^2 \rho_0 T_0 V_B} \frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2|}{P_H} = K_{V_B} \frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2|}{P_H}; \quad (2)$$

$$V_{np} = \frac{P_0}{\eta^2 \rho_0 T_0 V_{np}} |\Delta P_1 + \Delta P_2| = K_{V_{np}} |\Delta P_1 + \Delta P_2|; \quad (3)$$

$$M = \frac{P_0}{\eta^2 kg R \rho_0 T_0 M} \frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2|}{P_H} = K_M \frac{|\Delta P_1 + \Delta P_2|}{P_H}; \quad (4)$$

$$T_H = \frac{T_\tau}{1 + 0,2\xi M^2} = K_{T_H} T_\tau ; \quad (5)$$

$$\rho_H = \frac{\rho_0 T_0}{P_0} \frac{P_H}{T_H} = \frac{\rho_0 T_0}{P_0 K_{T_H}} \frac{P_H}{T_H} = K_{\rho_H} \frac{P_H}{T_H} ; \quad (6)$$

$$H = \frac{T_0}{\tau} \left[ 1 - \left( \frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right] = \frac{T_0}{\tau P_H} \left[ 1 - \left( \frac{P_H}{P_0} \right)^{\tau R} \right] = \frac{H}{P_H} P_H = K_H P_H ; \quad (7)$$

$$V_y = \frac{dH}{dt} = K_H \frac{dP_H}{dt} , \quad (8)$$

где  $\alpha_m$ ,  $V_B$ ,  $V_{пр}$ ,  $M$ ,  $T_H$ ,  $\rho_H$ ,  $H$ ,  $V_y$  – измеряемые воздушные параметры движения летательного аппарата относительно окружающей воздушной среды:  $\alpha_m$  – местный угол атаки в месте расположения интегрированного фюзеляжного приемника;  $V_B$ ,  $V_{пр}$ ,  $M$  – истинная воздушная скорость, приборная скорость и число Маха;  $T_H$ ,  $\rho_H$  – абсолютная температура и плотность воздуха на текущей барометрической высоте полета  $H$ ;  $V_y$  – вертикальная воздушная скорость;  $T_0$ ,  $P_0$ ,  $\rho_0$  – абсолютная температура, давление, плотность воздуха на высоте  $H = 0$ ;  $\eta = \frac{r_0}{r}$  – отношение радиуса  $r_0$  аэродинамического компенсатора к радиусу  $r$  расположения отверстий для восприятия давлений  $P_1$ ,  $P_2$ ;  $\tau$  – температурный коэффициент воздуха на высоте;  $k$  – постоянная адиабата воздуха;  $R$  – газовая постоянная воздуха;  $\xi$  – коэффициент торможения набегающего потока;  $K_{V_B}$ ,  $K_{V_{пр}}$ ,  $K_M$ ,  $K_{T_H}$ ,  $K_{\rho_H}$ ,  $K_H$  – размерные и безразмерные коэффициенты, определяемые из выражений (1) – (8).

Как показано в работах [9, 10], исследование динамических характеристик измерительных каналов приборов и систем проводится с использованием структурной схемы и их операторных чувствительно-стей.

В соответствии с конструктивной схемой и моделями (1) – (8) разработана структурная схема системы измерения воздушных параметров движения с неподвижным фюзеляжным приемником набегающего потока (рис. 2).

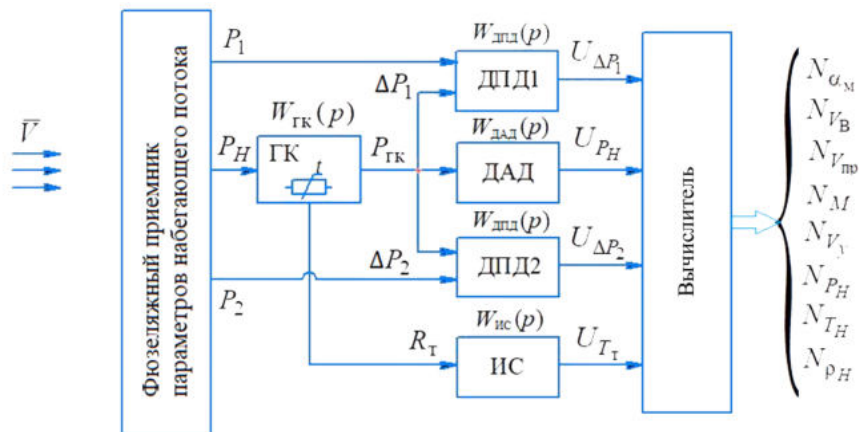


Рис. 2

Отверстие 2 для восприятия давления  $P_H$  соединено с глухой камерой с передаточной функцией  $W_{гк}(p)$ , обеспечивая формирование сглаженного статического давления  $P_{гк} = P_H$ . Глухая камера соединена со входом датчика абсолютного давления ДАД с передаточной функцией  $W_{дад}(p)$ , а также со входами датчиков перепадов (разности) давлений  $\Delta P_1 = P_1 - P_H$ ,  $\Delta P_2 = P_2 - P_H$  с передаточной функцией  $W_{дпд}(p)$ .

В глухой камере установлен терморезистор, сопротивление  $R_T$  которого пропорционально температуре  $T_T$  заторможенного набегающего воздушного потока. Терморезистор включен в измерительную схему с операторной чувствительностью  $W_{ис}(p)$ . Выходные сигналы датчиков ДАД, ДПД1, ДПД2 и измерительной схемы, например, в виде напряжений  $U_{PH}$ ,  $U_{\Delta P_1}$ ,  $U_{\Delta P_2}$ ,  $U_{T_T}$  подаются на входы вычислителя, который обеспечивает их аналого-цифровое преобразование, обработку в соответствии с моделями (1) – (8) и формирование цифровых сигналов  $N_{\alpha_M}$ ,  $N_{V_B}$ ,  $N_{V_{пр}}$ ,  $N_M$ ,  $N_H$ ,  $N_{V_y}$ ,  $N_{P_H}$ ,  $N_{T_H}$ ,  $N_{P_H}$  по воздушным параметрам движения летательного аппарата относительно окружающей воздушной среды.

В соответствии со структурной схемой рассматриваемой системы и моделями (1) – (8) определения выходных сигналов входящих измерительных каналов получены операторные чувствительности каждого канала измерения воздушных параметров движения летательного аппарата с использованием следующего подхода.

Примем, что аналого-цифровые преобразования и определения выходных сигналов измерительных каналов в вычислителе не вносят динамических искажений, и динамические характеристики измерительных каналов будут определяться только элементами формирования и преобразования параметров набегающего воздушного потока  $P_H$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  на выходе фюзеляжного приемника.

Тогда для канала измерения угла атаки в соответствии со структурной схемой (см. рис. 2) и моделью определения угла атаки (1) динамические характеристики измерительного канала местного угла атаки будут определяться операторной чувствительностью вида

$$W_{\alpha_M}(p) = W_{гк}(p)W_{ДПД}(p). \quad (9)$$

Для канала измерения истинной воздушной скорости с учетом модели (2) операторная чувствительность будет иметь вид

$$W_{V_B}(p) = K_{V_B}W_{гк}(p)W_{ДПД}(p)W_{ДАД}(p)W_{ис}(p). \quad (10)$$

Для канала измерения приборной скорости с учетом модели (3) операторная чувствительность будет иметь вид

$$W_{V_{пр}}(p) = K_{V_{пр}}W_{гк}(p)W_{ДПД}(p). \quad (11)$$

Для канала измерения числа Маха с учетом модели (4) операторная чувствительность будет иметь вид

$$W_M(p) = K_MW_{гк}(p)W_{ДАД}(p)W_{ДПД}(p). \quad (12)$$

Для канала измерения барометрической высоты в соответствии с моделью (7) операторная чувствительность будет иметь вид

$$W_H(p) = K_HW_{гк}(p)W_{ДАД}(p). \quad (13)$$

Для канала измерения вертикальной скорости в соответствии с моделью (8) операторная чувствительность будет иметь вид

$$W_{V_y}(p) = K_H p W_{гк}(p)W_{ДАД}(p). \quad (14)$$

Для канала измерения статического давления на текущей барометрической высоте операторная чувствительность будет иметь вид

$$W_{P_H}(p) = W_{гк}(p)W_{ДАД}(p). \quad (15)$$



Для канала измерения температуры наружного воздуха в соответствии с моделью (6) операторная чувствительность будет иметь вид

$$W_{TH}(p) = K_{TH} W_{гк}(p) W_{дАД}(p) W_{дПД}(p) W_{ис}(p). \quad (16)$$

Для канала измерения плотности на текущей барометрической высоте с учетом модели (6) операторная чувствительность будет иметь вид

$$W_{pH}(p) = K_{pH} W_{гк}(p) W_{дАД}(p) W_{дПД}(p) W_{ис}(p). \quad (17)$$

Как показано в работах [9, 10], при известных операторных чувствительностях  $W_{x_i}(p)$  измерительных каналов рассматриваемой системы изображения динамических погрешностей  $\Delta Y_i(p)$  каналов измерения при наличии внешней помехи  $\xi_i$  в операторной форме будут иметь вид

$$\Delta Y_i(p) = \Delta Y_{ic}(p) + \Delta Y_{ib}(p) = W_i(p) X_i(p) + W_i(p) \xi_i(p), \quad (18)$$

где  $\Delta Y_{ic}(p)$ ,  $\Delta Y_{ib}(p)$  – изображения собственной и вынужденной составляющих динамической погрешности  $i$ -го измерительного канала;  $X_i(p)$  – изображение входного сигнала  $x_i(t)$   $i$ -го канала;  $\xi_i(p)$  – изображение внешней помехи  $\xi_i$ .

При исследовании собственных динамических погрешностей измерительных каналов, как правило, используются типовые входные сигналы  $x_i(t)$ , которые характеризуют наиболее неблагоприятные режимы его эксплуатации и описываются детерминированными функциями времени. Согласно анализу в качестве типовых сигналов измерительных каналов бортовых приборов и систем используют скачкообразные изменения измеряемого параметра или его изменения с постоянной скоростью.

Если при известных значениях корней характеристического уравнения операторной чувствительности (10) канала измерения истинной воздушной скорости, например, один действительный корень  $p_1 = -k_1$  и два комплексно-сопряженных корня  $p_{2,3} = -k_{2,3} \pm j\omega_0$ , то при скачкообразном изменении истинной воздушной скорости  $V_B(t) = V_{B0} 1[t]$  с уровнем скачка  $V_{B0}$  модель для определения собственной динамической погрешности рассматриваемого канала будет иметь вид [10]

$$\Delta V_{bc}(t) = -V_{B0} \left\{ \frac{k_2^2 + \omega_0^2}{(k_1 - k_2)^2 + \omega_0^2} e^{-k_1 t} + \left[ \frac{-k_1(k_1 - 2k_2)}{(k_1 - k_2)^2 + \omega_0^2} \cos \omega_0 t - \frac{k_1(\omega_0^2 - k_2^2 - k_1 k_2)}{\omega_0[(k_1 - k_2)^2 + \omega_0^2]} \sin \omega_0 t \right] e^{-k_2 t} \right\}. \quad (19)$$

При изменении измеряемого параметра с постоянной скоростью установившееся значение собственной динамической погрешности измерительного канала, канала измерения истинной воздушной скорости будет определяться моделью вида

$$\Delta V_{bc}(t) = -\frac{k_1}{k_2} \dot{V}_0, \quad (20)$$

где  $\dot{V}_0 = \text{const}$  – величина постоянной скорости  $\dot{V}_{B0}$ .

При более сложных законах изменения измеряемого параметра  $x(t)$  рассматриваемой системы измерения воздушных параметров движения летательного аппарата можно использовать методику [9].

Вынужденная динамическая погрешность измерительных каналов рассматриваемой системы, например, канала измерения истинной воздушной скорости определяется моделью вида

$$\sigma_{в\Delta V_B}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{V_B}(p) - 1|^2 S_{V_B}(\omega) d\omega, \quad (21)$$

где  $S_{V_B}(\omega)$  – спектральная плотность мощности случайного стационарного процесса изменения истинной воздушной скорости;  $\sigma_{\Delta V_B}^2$  – дисперсия случайного стационарного процесса, значение которой для характерных этапов полета приведено в работе [11], при этом модель спектральной плотности мощности имеет вид

$$S_{V_B}(\omega) = \frac{\sigma_B^2}{\pi} \frac{a_{V_B}}{a_{V_B}^2 + \omega^2}, \quad (22)$$

где  $a_{V_B}$  – величина, обратная по величине интервалу корреляции  $\tau$  автокорреляционной функции стационарного случайного процесса изменения истинной воздушной скорости вида

$$K_{V_B}(\tau) = \sigma_{V_B}^2 e^{-a_{V_B}|\tau|}. \quad (23)$$

При полете летательного аппарата в пределах атмосферы основным характерным возмущением при измерении воздушных параметров движения летательного аппарата является случайная турбулентная атмосфера, стационарную продольную составляющую которой можно характеризовать спектральной плотностью мощности вида [12]

$$S_{\xi_x}(\omega) = \frac{2\sigma_{\xi_x}^2 L_x}{\pi} \frac{1}{1 + \left(\frac{L_x}{V_B} \omega\right)^2}, \quad (24)$$

где  $L_x$  – масштаб атмосферной турбулентности по продольной оси связанной системы координат;  $\sigma_{\xi_x}^2$  – дисперсия продольной атмосферной турбулентности.

Тогда дисперсия вынужденной динамической погрешности канала измерения истинной воздушной скорости системы измерения воздушных параметров движения летательного аппарата с фюзеляжным приемником параметров набегающего воздушного потока будет определяться моделью вида (21).

Дисперсия результирующей динамической погрешности канала измерения истинной воздушной скорости рассматриваемой системы будет определяться моделью

$$\sigma_{\Delta V_B}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{V_B}(p) - 1|_{p=j\omega}^2 S_{V_B}(\omega) d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |W_{V_B}(p)|_{p=j\omega}^2 S_{\xi_x}(\omega) d\omega. \quad (25)$$

Из выражения (25) следует, что для уменьшения собственной составляющей динамической погрешности измерительного канала операторную чувствительность  $W_{V_B}(p)$  необходимо приближать к единице, но при этом вынужденная составляющая динамической погрешности стремится к максимальному значению. Это определяет постановку задачи минимизации дисперсии результирующей динамической погрешности измерительного канала системы с использованием оптимального линейного фильтра Винера, решение которой приведено в работе [10].

Рассмотренная методика позволяет решать задачу определения моделей динамических погрешностей других измерительных каналов рассматриваемой системы измерения воздушных параметров движения летательного аппарата с фюзеляжным приемником потока.

Таким образом, разработанная структурная схема, модели операторных чувствительностей и составляющих динамической погрешности измерительных каналов являются теоретической основой для решения задач анализа и синтеза системы измерения воздушных параметров движения летательного аппарата с интегрированным неподвижным невыступающим фюзеляжным приемником параметров набегающего воздушного потока при заданных детерминированных и стационарных случайных законах изменения измеряемых воздушных параметров и внешних помех. Для минимизации динамических погрешностей каналов целесообразно использовать оптимальный линейный фильтр Винера.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Филатов Г.А., Пуминова Г.Г., Сильвестров П.В.* Безопасность полетов в возмущенной атмосфере. М.: Транспорт, 1992. 273 с.
2. *Синяков А.Н., Шаймарданов Ф.А.* Системы управления ЛА и их силовыми установками. М.: Машиностроение, 1991. 320 с.
3. *Кравцов В.Г., Алексеев Н.В.* Аэрометрия высотно-скоростных параметров летательных аппаратов // Приборы и системы: Управление, контроль, динамика. 2000. № 8. С. 47–50.
4. *Солдаткин В.М. и др.* Особенности построения, формирования и обработки информации системы воздушных сигналов самолета с фюзеляжным приемником параметров набегающего потока // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2023. № 3. С. 91–96.
5. *Солдаткин В.М. и др.* Модели и анализ погрешностей системы воздушных сигналов с неподвижным невыступающим приемником потока // Изв. вузов. Авиационная техника. 2024. № 2. С. 165–171.
6. *Ефремова Е.С., Солдаткин В.В., Солдаткин В.М.* Погрешности каналов системы измерения воздушных параметров движения летательных аппаратов с интегрированным фюзеляжным приемником потока // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. № 10. С. 822–830.
7. Фюзеляжный приемник статического давления с аэродинамическими компенсаторами: пат. 271140 Рос. Федерация, № 1241422/18-10; заявл. 14.05.1968; опубл. 12.05.1970, Бюл. № 17.
8. *Солдаткин В.М.* Методы и средства измерения аэродинамических углов летательных аппаратов. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2001. 448 с.
9. *Браславский Д.А., Петров В.В.* Точность измерительных устройств. М.: Машиностроение, 1976. 312 с.
10. *Солдаткин В.В., Солдаткин В.М.* Анализ погрешностей и методы повышения точности измерительных приборов и систем. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2009. 248 с.
11. *Иванов Ю.П., Синяков А.Н., Филатов И.В.* Комплексирование информационно-измерительных устройств летательных аппаратов. Л.: Машиностроение, 1984. 208 с.
12. *Макаров Н.Н.* Системы обеспечения безопасности функционирования бортового эргодического комплекса: теория, проектирование, применение. М.: Машиностроение, 2009. 760 с.

Поступила в редколлегию 18.04.25

## STRUCTURAL DIAGRAM, MODELS OF OPERATOR SENSITIVITIES AND DYNAMIC ERRORS OF CHANNELS OF THE SYSTEM OF MEASURING AIR PARAMETERS OF MOTION OF THE AIRCRAFT WITH A FUSELAGE RECEIVER OF THE INCIDENTAL FLOW

**V.M. Soldatkin, V.V. Soldatkin, E.S. Efremova, R.V. Kozlovskii,  
and G.V. Kozlovskii**

The importance of reliable information about air movement parameters relative to the environment for solving control tasks and ensuring flight safety of an aircraft (AI) is noted. The limitations of traditional aviation systems for measuring air parameters of aircraft movement with receivers and sensors of the parameters of the incident flow, connected to an onboard computer, distributed over the fuselage and protruding into the oncoming air flow. This determines the prospects for developing the system under consideration with a fixed, non-protruding fuselage receiver of the incident flow and a built-in computer. Using the previously published design scheme and models for determining aircraft air movement parameters, a structural diagram, models of operator sensitivities and dynamic errors of the measuring channels of the system under consideration under deterministic and random influences have been developed, allowing solving the problems of analyzing and synthesizing dynamic errors of the measuring channels of the system.

**Keywords:** aircraft, motion, air parameters, measurement, fuselage receiver, dynamic errors, models.

---

**Солдаткин Владимир Михайлович** – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)  
E-mail: w-soldatkin@mail.ru

**Солдаткин Вячеслав Владимирович** – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: w-soldatkin@mail.ru

**Ефремова Елена Сергеевна** – канд. техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: soldatkina1991@bk.ru

**Козловский Роман Владимирович** – студент (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: KozlovskiyRV@stud.kai.ru

**Козловский Глеб Владимирович** – студент (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: KozlovskiyGV@stud.kai.ru

## КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКОВ: СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Р.Р. Хусаинов, Ю.К. Евдокимов

Представлен обзор современных методов контроля и диагностики потоков многофазных сред. Описаны традиционные подходы, реализуемые на основе автоматизированных групповых замерных установок, а также бессепарационные методы, включая многофазные расходомеры и методы, основанные на применении нейросетевых технологий. Проведен сравнительный анализ технических характеристик рассматриваемых решений, выявлены их ключевые преимущества и ограничения. Основное внимание уделено практической применимости методов в условиях сложных эксплуатационных условий, характерных для объектов современной нефтегазодобычи.

**Ключевые слова:** расходомер, многофазный поток, нефть, газ, сепарация, нейросети, автоматизация.

Нефтегазодобывающая промышленность играет важную роль в экономике России [1, 2], и значимость добычи полезных ископаемых только возрастает. Современная нефтегазодобывающая промышленность характеризуется высокими требованиями к точности контроля и диагностики многофазных сред, что обусловлено необходимостью обеспечения эффективности эксплуатации месторождений.

Многофазной называют среду, в которой одновременно присутствуют несколько несмешивающихся фаз, чаще всего жидкость и газ. В нефтегазовой отрасли это, как правило, смесь нефти, воды и газа, протекающая по трубопроводу. Контроль и диагностика многофазных сред представляет собой сложную задачу по ряду причин [3]. Прежде всего, наличие нескольких фаз с различными физико-химическими свойствами (плотность, вязкость, скорость) усложняет диагностику течения. Внутри трубопровода возможны переходы между различными режимами течения – пузырьковым, струйным, кольцевым – в зависимости от давления, температуры и фазового состава. Смены режимов течения многофазных сред отличаются нелинейностью и отсутствием стационарности, что существенно затрудняет как прямое измерение параметров потока, так и построение универсальных моделей течения, обеспечивающих достоверную интерпретацию полученных данных.

Увеличивающаяся сложность условий добычи, включая повышение обводненности и содержания газа в продукции нефтяных скважин [4], обуславливает необходимость разработки и внедрения новых методов измерений, характеризующихся не только высокой точностью, но и способностью к оперативной адаптации к изменяющимся условиям. В современных эксплуатационных условиях измерительные системы должны демонстрировать устойчивость к вариативности таких параметров, как давление, температура, фазовый состав и скорость потока. Это требует применения адаптивных алгоритмов обработки данных, способных эффективно компенсировать нестабильность режимов течения и обеспечивать надежную интерпретацию измерительной информации. В России учет нефти при добыче осуществляется в соответствии с правилами учета нефти, утвержденными постановлением Правительства РФ от 16.05.2014 № 451 и ГОСТ Р 8.1016-2022 [5]. Рекомендуемая погрешность при измерении количества скважинной жидкости не должна превышать  $\pm 2,5$  % (без содержания воды),  $\pm 6$  % при содержании воды в пределах 0...70 % и  $\pm 15$  % при содержании воды свыше 70...95 %, при измерении объема попутного нефтяного газа в составе нефтегазоводяной смеси, приведенного к стандартным условиям, – не более 5 %.

Методы контроля и диагностики многофазных потоков условно подразделяют на сепарационные и бессепарационные [6]. Перспективным направлением является использование нейросетевых технологий [7], которые позволяют не только повысить точность измерений за счет способности учитывать нелинейные зависимости и сложные взаимосвязи параметров среды, но и адаптировать системы измерений к динамично меняющимся условиям без существенных дополнительных затрат.

Особый интерес представляет интеграция нейросетевых решений с традиционными физическими методами контроля и диагностики [8]. Гибридные системы способны использовать преимущества обоих подходов, минимизируя при этом недостатки каждого из них. Например, сочетание многофазных расходомеров с нейросетевым анализом данных может обеспечить высокую точность и надежность измерений в широком диапазоне технологических параметров. Для успешного внедрения таких систем необходимы глубокие исследования, включающие как лабораторные эксперименты, так и полевые испытания. Также актуальна разработка универсальных подходов к формированию и обучению нейросетевых моделей, обеспечивающих их быструю и эффективную адаптацию к разнообразным условиям эксплуатации.

Далее будет представлен детализированный анализ методов, применяемых для контроля и диагностики многофазных потоков, включая сепарационные, бессепарационные, а также подходы, основанные на нейросетевых технологиях. Целью анализа является выявление их функциональных преимуществ и ограничений.

Основными представителями сепарационного метода являются автоматизированные групповые замерные установки, позволяющие разделить многофазную смесь на отдельные фазы и измерить их расход отдельно, используя однофазные расходомеры. Существует два основных принципа работы автоматизированных групповых замерных установок: поточный с поддержанием уровня жидкости и накопительный (выдавливание жидкости осуществляется подпором газа). На рынке представлено огромное количество автоматизированных групповых замерных установок в зависимости от требуемых параметров скважины. Опубликовано множество исследований на тему повышения эффективности автоматизированных групповых замерных установок [9–17]. Сепарационный метод измерений имеет ряд недостатков. Существенным недостатком является проблема неполной сепарации свободного нефтяного газа, что наиболее явно проявляется на высокодебитных скважинах с высокой производительностью. Содержание свободного нефтяного газа после сепарации может достигать до 20 % по объему без учета растворенного в жидкости газа [18]. К факторам, снижающим качество сепарации, относятся недостаточное время нахождения многофазной смеси в сепараторе, высокое давление в сепараторе, неблагоприятные температурные условия. С этим связан еще один недостаток – длительность разделения фаз, особенно при близких плотностях. Также существует проблема попадания капельной жидкости в каналы измерения газа. Из-за этого средства измерений работают в условиях, не предназначенных для их работы (на двухфазной среде). Применение автоматизированных групповых замерных установок с сепаратором, особенно в случае больших расходов, когда объем сепаратора существен, сопряжено со множеством сложностей, связанных с габаритами, поддержанием работоспособности, периодическим обслуживанием, калибровкой при изменении параметров измеряемой смеси и дальнейшем использовании. Кроме того, из-за принципа работы возникают существенные погрешности на скважинах, так как газ проскакивает в линию жидкости, а жидкость в линию газа.

Преимуществом таких установок является простота и проверенные временем технические решения. Несмотря на широкое распространение и проверенные технические решения, сепарационные методы имеют ряд существенных ограничений, что стимулировало развитие альтернативных решений – бессепарационных методов измерения, позволяющих осуществлять контроль параметров потока без предварительного разделения фаз. Эти технологии активно применяются для решения задач контроля расхода в реальном времени.

Бессепарационный метод измерений предполагает учет количества газа и жидкости напрямую, без необходимости разделения фаз [19, 20]. Примером бессепарационного метода являются многофазные расходомеры. В большинстве своем бессепарационные методы для измерения многофазной смеси базируются на сочетании по меньшей мере трех различных методов. Широко распространена технология, основанная на использовании трубки Вентури (при прохождении потока через трубку создается перепад давления) и датчиков перепада давления (где измеренное значение перепада давления преобразуется в расход [21–25]), а также источника радиоактивного излучения и детектора для определения плотности (гамма-плотномер) [26–28]. Гамма-плотномер содержит радиоактивный источник, который излучает

ет гамма-лучи. Радиоактивный источник подбирается таким образом, чтобы иметь естественный энергетический пик в требуемом диапазоне [29–31]. Детектор регистрирует гамма-лучи, ослабленные многофазной смесью. Ослабления на двух уровнях энергии сравнивают с эталонными ослаблениями от чистой нефти, воды и газа. Обработкой данных измерений можно вычислить большое количество параметров, таких, как доли компонентов (газ, нефть и вода). Кроме того, могут использоваться емкостные или СВЧ-датчики для контроля солености воды и других параметров.

Большинство многофазных расходомеров имеют два режима работы (многофазный поток и влажный газ [32]) и автоматически переключаются между ними, используя алгоритм определения режима потока.

Основными недостатками многофазных расходомеров с использованием комбинации трубки Вентури и гамма-плотногомера являются высокая стоимость и наличие радиоактивного источника. Трубки Вентури высокоточны, однако их применение ограничено относительно малым динамическим диапазоном и низкой точностью при низких скоростях потока, точность уменьшается с уменьшением числа Рейнольдса.

Существуют альтернативные бессепарационные методы измерений. В настоящее время большинство этих технологий требуют особых условий эксплуатации и являются дорогостоящими, что затрудняет их внедрение в промышленность.

Расходомеры на основе ядерно-магнитного резонанса [33, 34] функционируют за счет воздействия магнитного поля и радиочастотного сигнала на газожидкостную смесь. Изменения в электромагнитных свойствах молекул под воздействием этого поля позволяют определить данные о потоке. Однако такие расходомеры крайне чувствительны к внешним факторам и имеют ограничения по диапазону расходов.

Принцип работы расходомеров на основе рентгеновского излучения [35–40] схож с гамма-плотномерами. Однако исследования в этой области ограничены, что может быть связано с тем, что энергия рентгеновского излучения относительно ниже энергии гамма-излучения, из-за чего чувствительность датчика ниже, особенно для многофазного потока с высокой плотностью. Кроме того, энергия генерируемых фотонов и стабильность пучка зависят от колебания температуры.

Несмотря на технологическую сложность и высокие затраты, бессепарационные методы измерения демонстрируют высокую оперативность и метрологическую точность. В этих условиях особую значимость приобретают интеллектуальные подходы, прежде всего нейросетевые технологии, с помощью которых возможно обрабатывать большие объемы данных, выявлять скрытые закономерности и адаптироваться к изменяющимся характеристикам потока без усложнения аппаратной части измерительного комплекса. Интеграция нейросетевых моделей может снизить совокупные затраты за счет сокращения количества измерительных каналов и отказа от дорогостоящих физических датчиков. Такой подход открывает возможности для разработки компактных, гибко настраиваемых систем контроля.

В отличие от традиционных методов, опирающихся на физические модели и требующих точной калибровки измерительной аппаратуры, нейросетевые алгоритмы позволяют строить эмпирические модели на основе большого объема данных. Это обеспечивает возможность адаптации к различным режимам течения, повышает устойчивость диагностики к шумам и снижает зависимость от физических ограничений конкретных приборов. Использование нейросетевых технологий позволяет реализовать интеллектуальные измерительные системы, способные эффективно функционировать в условиях неполной информации и высокой динамики процесса.

Для подтверждения работоспособности и эффективности данных методов необходимо проводить как лабораторные исследования, так и полевые испытания. В лабораторных условиях создаются специальные экспериментальные установки [41, 42], позволяющие воспроизвести различные режимы многофазного течения. На таких установках осуществляется сбор большого объема данных, включающих параметры давления, температуры, скорости потока, фазовый состав и плотность среды.

Полученные данные используются для разработки и обучения нейросетевых моделей. Важнейшим этапом экспериментальной методики является формирование обучающих выборок, которые охватывают весь диапазон возможных эксплуатационных условий. Такие выборки позволяют нейросетевым алго-

ритмам эффективно выявлять и моделировать сложные нелинейные зависимости и адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации.

Современные модели включают использование различных архитектур нейронных сетей, таких, как Multilayer Perceptrons (MLP), Recurrent Neural Networks (RNN), Long Short-Term Memory (LSTM) и Convolutional Neural Networks (CNN) [43–46]. MLP применяются для задач с фиксированной структурой данных, RNN и LSTM – для анализа временных зависимостей в последовательностях, а CNN – для обработки пространственно структурированных сигналов. Выбор конкретной архитектуры зависит от поставленных задач и специфики измеряемого потока. В ряде случаев наибольшую эффективность демонстрируют гибридные нейросетевые модели, объединяющие преимущества различных архитектур для повышения точности измерений.

В современных технологических процессах, особенно в нефтегазовой отрасли, задача своевременного и точного определения текущего режима течения многофазного потока имеет существенное значение для обеспечения точности измерений. Одним из эффективных решений данной задачи может являться применение идентификатора режимов течения, который представляет собой специализированный алгоритмический модуль, предназначенный для автоматизированного определения структуры потока многофазной среды на основе анализа комплекса диагностических параметров, формируемых на основании данных с различных датчиков.

Возможно использование нейросетевых технологий для двух самостоятельных задач – идентификации (классификации) режимов течения многофазного потока и измерения и контроля собственно расхода многофазного потока.

Вторая задача требует намного большего объема априорной и текущей информации о многофазном потоке, чем первая. Однако для решения второй задачи требуется обязательное решение первой задачи, поэтому в настоящей работе рассмотрим подробнее подход к решению первой задачи. При этом возникает вопрос о важности информации о режимах течения и необходимости идентификационных данных, полученных на основе нейросетевой технологии. Точные данные о режимах течения многофазного потока позволяют определить в реальном масштабе времени режим течения в многофазном расходомере в широком диапазоне его работы, вносить необходимые поправки в характеристику преобразования расходомера при учете режимов течения, повысить точность и достоверность измерения бессепарационных методов.

Принцип работы идентификатора режимов течения основан на сборе данных с физических датчиков, их преобразовании во входной вектор признаков и на последующем использовании нейросетевых методов обучения, формировании выходного вектора – идентификатора (классификатора) режимов течения. Данный подход может обеспечить высокую воспроизводимость и надежность диагностики, а также способствовать оптимизации процессов контроля многофазных потоков в промышленных условиях. Схематическое представление принципа работы идентификатора приведено на рисунке.





На первом этапе осуществляется сбор первичных данных, поступающих с измерительных датчиков. Регистрируемые параметры отражают состояние и структуру многофазного потока (нефть, вода, газ). К таким параметрам, как правило, относятся массовый расход жидкости ( $Q_{\text{жид}}$ , т/ч), объемный расход газа ( $Q_{\text{газ}}$ , м<sup>3</sup>/ч), температура среды в трубе ( $T_{\text{среда}}$ , °C), температура окружающей среды ( $T_{\text{окр.среда}}$ , °C), давление в трубе ( $P_{\text{среда}}$ , МПа), давление окружающей среды ( $P_{\text{окр.среда}}$ , МПа), фазовое отношение сред ( $\phi$ , %).

Данные, поступающие с измерительных датчиков, могут содержать шумы, а также отдельные пропуски измерений, обусловленные как особенностями аппаратного обеспечения, так и внешними воздействиями. Для обеспечения достоверности последующего анализа на втором этапе проводится математическая обработка первичных данных, включающая фильтрацию шумов и интерполяцию отсутствующих значений. В результате формируется очищенный и целостный набор данных, который является основой для построения вектора признаков и последующего анализа режимов течения.

На втором этапе из предварительно обработанных данных формируется расширенный вектор признаков, включающий как исходные измеренные параметры, так и расчетные, которые повышают вероятность корректной классификации режимов течения. Примером такого расчетного признака является газовый фактор GVF (Gas Volume Fraction), который определяется следующим образом:

$$\text{GVF} = \frac{Q_{\text{газ}}}{Q_{\text{газ}} + Q_{\text{жид}}}.$$

Итоговый вектор признаков может иметь следующий вид:

$$X = [Q_{\text{жид}}, Q_{\text{газ}}, T_{\text{среда}}, T_{\text{окр.среда}}, P_{\text{среда}}, P_{\text{окр.среда}}, \phi, \text{GVF}, \dots].$$

На третьем этапе осуществляется нормализация вектора признаков с целью устранения различий в диапазонах и масштабах отдельных параметров. Для этого используются методы линейного масштабирования, стандартизации, а также могут формироваться дополнительные признаки на основе нелинейных комбинаций исходных параметров.

На четвертом этапе нормализованный вектор признаков подается на вход обученной нейронной сети (например, многослойный перцептрон, MLP). Сигнал обрабатывается по следующему принципу: каждый нейрон слоя вычисляет свое выходное значение как функцию взвешенной суммы всех входов с добавлением смещения. Формально для  $j$ -го нейрона слоя вычисление записывается как

$$h_j = f\left(\sum_{i=1}^n \omega_{ij}x_i + b_j\right),$$

где  $h_j$  – выход (активация)  $j$ -го нейрона слоя;  $f$  – функция активации;  $\omega_{ij}$  – вес, показывающий важность связи между входом  $x_i$  и нейроном  $j$ ;  $x_i$  – значение  $i$ -го входного признака (например, расход, давление, температура и т. д.);  $b_j$  – смещение нейрона  $j$  (аналог «порогового» значения, необходимого для активации);  $n$  – число входных признаков (нейронов в предыдущем слое).

Для задачи идентификации режимов течения выходной слой нейросетевой модели реализуется с использованием softmax-функции, которая преобразует набор выходных сигналов в вероятностное распределение по возможным режимам:

$$y_k = \frac{\exp(z_k)}{\sum_{l=1}^K \exp(z_l)},$$

где  $z_k$  – выход для  $k$ -го режима (например, пузырьковый);  $K$  – общее количество режимов течения, которые различает идентификатор.

На пятом этапе осуществляется валидация результата, полученного от идентификатора режимов течения. Проверяется наличие ошибок классификации, а также уровень уверенности нейросетевой модели в выбранном режиме. В случаях когда прогноз сопровождается низкой вероятностью, соответствующие данные маркируются как неопределенные и могут направляться на повторную обработку или дополнительное обучение модели. Для количественной оценки точности идентификации используется функция потерь на основе кросс-энтропии, позволяющая сравнивать спрогнозированное вероятностное распределение по режимам с истинными маркерами для каждого примера. Формула кросс-энтропии записывается следующим образом:

$$E = - \sum_{k=1}^K t_k \log(y_k),$$

где  $E$  – значение ошибки;  $t_k$  – целевой маркер режима течения;  $y_k$  – вероятность принадлежности к режиму  $k$ .

На финальном, шестом этапе определяется итоговый режим течения, прогноз идентификатора выбирается как режим, которому соответствует максимальное значение вероятности на выходе модели. Формула прогнозируемого режима течения записывается следующим образом:

$$c = \arg \max_k (y_k),$$

где  $c$  – прогнозируемый режим течения;  $k$  – индекс режима течения.

Описанный принцип позволяет реализовать автоматизированную идентификацию режимов течения.

Дальнейшие исследования в области совершенствования нейросетевых методов и их интеграция с бессепарационными физическими методами [47] являются важным направлением развития технологии измерений многофазных потоков, способствующим решению актуальных задач нефтегазовой отрасли.

На основании проведенного анализа существующих методов измерения многофазных потоков можно сделать вывод о том, что современные тенденции развития технологии направлены на интеграцию традиционных физических методов и интеллектуальных решений, основанных на нейросетевых моделях. Важным аспектом для дальнейших исследований является разработка гибридных систем, объединяющих физические принципы измерения и нейросетевые алгоритмы обработки данных. Такой подход позволяет минимизировать недостатки отдельных методов и эффективно использовать их преимущества. Кроме того, перспективы развития связаны с формированием универсальных обучающих выборок и созданием специализированных программно-аппаратных комплексов. Дальнейшие работы должны быть сосредоточены на изучении и оптимизации нейросетевых моделей, а также на проведении испытаний и апробации предложенных решений на реальных объектах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Назарова Ю.А., Лышко А.А., Горюнов И.О. Современное состояние и перспективы развития нефтегазовой отрасли в контексте обеспечения экономической безопасности // Вестник РГГУ. Сер. Экономика. Управление. Право. 2022. № 3. С. 75–87.
2. Грязнов С.А. Нефтяная отрасль России: вызовы и перспективы // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 84-3. С. 54–56.
3. Антощук А.М. Повышение эффективности эксплуатации скважин с электроцентробежными насосами в условиях высокого газового фактора на месторождениях Западной Сибири. Томск. ТПУ, 2024. 42 с.
4. Falcone G. Multiphase Flow Fundamentals // Developments in Petroleum Science. 2009. № 54. С. 1–18.
5. ГОСТ Р 8.1016-2022. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения количества извлекаемой из недр нефти и нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 7 с.
6. Немиров М.С. Состояние и перспективы повышения точности измерений и учета нефти // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2013. № 6. С. 8–11.
7. Ушаков С.Н. Разработка виртуального расходомера с целью прогноза суточного дебита нефтегазовой скважины // Молодежь и современные информационные технологии: Сб. тр. 20-й Междунар.

- науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 20–22 марта 2023. Томск: ТПУ, 2023. С. 266–267.
8. Ревков А.О., Волосников А.С. Оценка расхода двухфазного потока с применением нейронных сетей для кориолисова расходомера // Проблемы получения, обработки и передачи измерительной информации: Сб. тр. 2019. Уфа: УГАТ, 2019. С. 238–242.
  9. Габдрахимов М.С., Гимазетдинов И.М. Замерное устройство АГЗУ ОЗНА-массомер для работы в низкотемпературных регионах // Материалы 47-й Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов с междунар. участием, г. Октябрьский, 24 апр. 2020. Уфа: УГНТУ, 2020. С. 468–473.
  10. Сиразетдинов Р.Р. Модернизация АГЗУ // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии: Сб. материалов. Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт, 2021. С. 472–474.
  11. Шарафиев Л.Р., Галимуллин М.Л. АГЗУ «ОЗНА-массомер» с увеличенным ресурсом ПСМ // Материалы 47-й Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов с междунар. участием, г. Октябрьский, 24 апр. 2020. Уфа: УГНТУ, 2020. С. 373–376.
  12. Ярышев Ю.Г., Калинин И.М., Ложкин М.Г. Применение стандартного оборудования АГЗУ «Спутник» для целей мониторинга газового фактора добывающего фонда скважин // Нефть и газ Западной Сибири: Сб. тр. Тюмень: ТИУ, 2007. С. 101–104.
  13. Некрасов А.В., Мясоутов Р.Ф., Родионцев А.Г. Улучшение эксплуатационных характеристик АГЗУ «Спутник-А» в условиях Самотлорского месторождения // Проблемы и перспективы разработки и внедрения передовых: Сб. ст. Уфа: Аэтерна, 2024. С. 29–31.
  14. Ярышев Г.М., Ярышев Ю.Г., Горчаков В.Г. Мониторинг отборов газа: использование современных методов для мониторинга отборов газа и газового фактора на базе стандартных АГЗУ «Спутник» и средств контроля технологических режимов работы скважин на месторождениях ООО «Лукойл-Коми» // Экспозиция. Нефть. Газ. 2009. № 1. С. 20–21.
  15. Шаякберов В.Ф. Совершенствование технологии поскважинного контроля и учета добычи продукции // Нефтегазовое дело. 2012. № 3. С. 4–15.
  16. Савельева Н.Н. Совершенствование технологического оборудования системы сбора и подготовки скважинной продукции // Современные наукоемкие технологии. 2019. № 2. С. 138–142.
  17. Степанов Д.И., Сулейманов Р.И. Усовершенствование блока разделения продукции скважины в установке АГЗУ Спутник АМ50-10-600КМ // Материалы 45-й Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Октябрьский, 27 апр. 2018. Уфа: УГНТУ, 2018. С. 357–360.
  18. Андрейчиков Б. Проблемы и решения по модернизации АГЗУ типов «Спутник» и «Мера» в нефтедобывающей промышленности // Современные технологии автоматизации (СТА). 2010. № 4. С. 36–49.
  19. Зимин М.И., Исаченко И.Н. Измерения бессепарационным методом расхода и количества продукции, извлекаемой из газоконденсатной скважины // ИСУП. 2011. № 5. С. 66–68.
  20. Крошкин А.Н., Лищук А.Н. Новая технология бессепарационного измерения продукции нефтяных скважин // Автоматизация в промышленности. 2014. № 5. С. 25–29.
  21. Гречко А.Г., Новиков А.И. Обзор подводных многофазных расходомеров // Газовая промышленность. 2019. № S1 (782). С. 71–78.
  22. Михеев В.А., Вакулин А.А., Черкашов Е.М. Бессепарационный многофазный расходомер как «подрывная» инновация в нефтегазовой отрасли и проблемы ее продвижения // Наука и бизнес: пути развития. 2017. № 3 (69). С. 5–13.
  23. Хафизов Д.А. Разработка модели многофазного расходомера // Теплофизика, теплотехника, гидрогазодинамика. Инновационные технологии: Сб. ст. Тюмень, 2016. С. 140–147.
  24. Кокуев А.Г., Сорин А.В. Устройство для измерения расхода многофазного потока // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2015. № 1. С. 7–14.
  25. Кадулин В.А., Юлин А.Е. Обзор существующих многофазных расходомеров // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии: Сб. материалов 5-й Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, г. Альметьевск, 13 нояб. 2020. Альметьевск: АГНИ, 2020. С. 415–419.
  26. Свешников Б.Н. Двухизотопный спектрометрический гамма-плотномер для диагностики трехфазных потоков нефть – вода – газ // Письма в журнал «Физика элементарных частиц и атомного ядра». 2021. № 1. С. 58–72.
  27. Филиппов Ю.П., Филиппов А.Ю. Определение расходов в горизонтальных двухфазных потоках вода – газ и особенности работы конического сужающего устройства в мультифазном расходомере с гамма-плотномером // Тепловые процессы в технике. 2021. № 3. С. 98–110.
  28. Святохин В.Д. Исследования метрологических характеристик скважинных гамма-плотномеров-толщиномеров // Каротажник. 2015. № 2. С. 78–86.
  29. Кочубей А.В., Коновалов Г.Г. О криминалистических особенностях обращения с источниками радиоактивного излучения // Вестник Краснодарского университета МВД России. 2016. № 1 (31). С. 106–109.

30. Shim W.J. Measurements of Two-Phase, Air-Water, Flow in Tube and Annulus. Columbia University, 1993. 174 с.
31. Crouthamel C.E., Adams F., Dams R. Applied Gamma-Ray Spectrometry. Elsevier, 2013. Vol. 41. 749 p.
32. Соловьев В.Г. и др. Воспроизведение расхода газожидкостной смеси в режиме «влажного газа» на Государственном первичном специальном эталоне единицы массового расхода газожидкостных смесей ГЭТ 195-2011 // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2014. № 4. С. 58–61.
33. Давыдов В.В., Дудкин В.И., Карсеев А.Ю. Малогабаритный меточный ядерно-магнитный расходомер для измерения быстроменяющихся расходов жидкости // Измерительная техника. 2015. № 3. С. 48–51.
34. Парфенова В.С. Анализ использования ядерно-магнитных расходомеров при измерении расхода скважинной жидкости // Тинчуринские чтения: Сб. тез., г. Казань, 27 апр. 2018. Казань: КГЭУ, 2018. С. 111–113.
35. Шулаев Н.А. Разработка концепта мультифазного расходомера // Изв. вузов. Нефть и газ. 2022. № 2. С. 98–111.
36. Аксенов В.С. и др. Применение рентгеновского визуализирующего устройства для определения скорости и фазового состава многофазного потока // Горение и взрыв. 2012. № 5. С. 153–158.
37. Basahel A. et al. Application of Feature Extraction and Artificial Intelligence Techniques for Increasing the Accuracy of X-Ray Radiation Based Two Phase Flow Meter // Mathematics. 2021. Vol. 9. № 11. Article № 1227.
38. Alanazi A.K. et al. Optimization of X-Ray Tube Voltage to Improve the Precision of Two Phase Flow Meters Used in Petroleum Industry // Sustainability. 2021. Vol. 13. № 24. Article № 13622.
39. Salgado C.M. et al. Three-Phase Flow Meters Based on X-Rays and Artificial Neural Network to Measure the Flow Compositions // Flow Measurement and Instrumentation. 2021. Vol. 82. Article № 102075.
40. Zubakin A.A. et al. Development of an Innovational Multiphase X-Ray Flowmeter // SPE Russian Petroleum Technology Conference, Virtual, October 2021. Paper № SPE-206472-MS.
41. Петров В.Н. и др. Многофазные испытательные стенды газожидкостных смесей: метрология, моделирование, подобие. Казань: КНИТУ, 2020. 136 с.
42. Петров В.Н. и др. Многофазные испытательные стенды газожидкостных смесей: аппараты, аттестация, воспроизведение. Казань: КНИТУ, 2022. 196 с.
43. Almeida L.B. Multilayer Perceptrons // Handbook of Neural Computation. CRC Press, 2020. P. C1.2:1–C1.2:30.
44. Mienye I.D., Swart T.G., Obaido G. Recurrent Neural Networks: A Comprehensive Review of Architectures, Variants, and Applications // Information. 2024. Vol. 15. № 9. Article № 517.
45. Bansal M., Goyal A., Choudhary A. A Comparative Analysis of  $k$ -Nearest Neighbor, Genetic, Support Vector Machine, Decision Tree, and Long Short Term Memory Algorithms in Machine Learning // Decision Analytics Journal. 2022. Vol. 3. Article № 100071.
46. Taye M.M. Theoretical Understanding of Convolutional Neural Network: Concepts, Architectures, Applications, Future Directions // Computation. 2023. Vol. 11. № 3. Article № 52.
47. Bahrami S. et al. Application of Artificial Neural Network to Multiphase Flow Metering: A Review // Flow Measurement and Instrumentation. 2024. Vol. 97. Article № 102601.

Поступила в редколлегию 21.05.25

## MONITORING AND DIAGNOSTICS OF MULTIPHASE FLOWS: MODERN PROBLEMS AND THE USE OF NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES

**R.R. Khusainov and Yu.K. Evdokimov**

The article provides an overview of modern methods for monitoring and diagnosing multiphase flow systems. Traditional approaches based on automated group metering units are described, as well as promising non-separation methods, including multiphase flowmeters and techniques based on the application of neural network technologies. A comparative analysis of the technical characteristics of the reviewed solutions is conducted, highlighting their key advantages and limitations. Particular attention is paid to the practical applicability of the methods under the challenging operational conditions typical of modern oil and gas production facilities.

**Keywords:** flowmeter, multiphase flow, oil, gas, separation, neural networks, automation.

---

**Хусаинов Ришат Рафаилович** – аспирант (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: Rishat1497@mail.ru

**Евдокимов Юрий Кириллович** – д-р техн. наук (КНИТУ-КАИ, Казань)

E-mail: yukevdokimov@kai.ru

# УЛУЧШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РЕКОНСТРУКЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

С.Г. Чумаров, В.И. Семенов, Д.Д. Сас

Представлены результаты исследования точности реконструкции изображений известным алгоритмом Малла и разработанным алгоритмом вейвлет-преобразования в частотной области с использованием быстрого преобразования Фурье. Алгоритмы прямого и обратного вейвлет-преобразования в частотной области с использованием вейвлетов на основе производных функции Гаусса позволяют декомпозировать и реконструировать изображение как разверткой по строкам и столбцам, так и прогрессивной разверткой по горизонтали и вертикали. Для более точной декомпозиции и реконструкции изображений сконструированы вейвлеты с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой, что позволило еще больше увеличить скорость вычисления прямого и обратного вейвлет-преобразования. Вейвлеты с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой демонстрируют комплекс необходимых свойств (ортогональность, гладкость, компактность и наличие либо симметрии, либо антисимметрии), благодаря чему возможно значительно точнее реконструировать изображение в сравнении с вейвлетами Добеши.

**Ключевые слова:** вейвлет-преобразование, преобразование Фурье, амплитудно-частотная характеристика, алгоритм, декомпозиция, реконструкция.

Декомпозиция и реконструкция изображений – это важные процессы, используемые в различных областях, таких, как компьютерное зрение [1], обработка изображений [2], медицинская визуализация и т. д.

Наиболее распространенной количественной характеристикой точности реконструкции является среднеквадратическое отклонение между реконструированным изображением и оригиналом:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}},$$

где  $x_i$  – интенсивность  $i$ -го пикселя оригинала;  $y_i$  – интенсивность  $i$ -го пикселя реконструированного изображения;  $n$  – общее количество пикселей. В случае обработки цветного RGB-изображения оценка среднеквадратического отклонения производится отдельно по каждому цвету.

Вейвлет-преобразование – это мощный инструмент для декомпозиции и реконструкции сигналов и изображений, который имеет преимущества по сравнению с другими методами, например, как Фурье-преобразование. Таким образом, для анализа изображений в статье используется математический аппарат вейвлет-преобразования [3].

Цель работы – увеличение точности декомпозиции и реконструкции двумерных сигналов и быстрого действия вычисления в реализованных алгоритмах. Для этого необходимо решить следующие задачи: определение условий повышения точности реконструкции изображений, анализ алгоритма Малла для выявления его достоинств и недостатков, исследование возможностей существующих и предложенных алгоритмов для решения задач реконструкции изображений с резкой границей переходов интенсивности, компьютерное моделирование, анализ результатов и разработка рекомендаций по применению алгоритмов вейвлет-преобразования в частотной области.

В пакете расширения Wavelet Toolbox математической платформы MATLAB для декомпозиции и реконструкции используется алгоритм Малла [4] на основе вейвлетов Добеши [5] – один из наиболее известных и быстрых алгоритмов дискретного вейвлет-преобразования. И. Добеши удалось построить последовательность ортогональных вейвлетов, каждый из которых определяется конечным числом коэффициентов. Преимущество этого алгоритма заключается в его простоте и высокой скорости: требуется порядка  $cN$  операций, где  $c$  – число коэффициентов;  $N$  – длина выборки. Однако алгоритм Малла имеет

ряд недостатков: необходимость использования масштабирующей функции; неравномерная амплитудно-частотная характеристика вейвлетов, несимметричность или антисимметричность вейвлетов, коэффициент изменения масштаба только с кратностью 2. Кроме того, точность вычисления уменьшается с увеличением уровня разложения, так как при каждом уровне декомпозиции длина выборки уменьшается в два раза; отсутствует прогрессивная развертка изображения при кратномасштабном анализе; необходимо решать большое количество уравнений для конструирования вейвлетов больших порядков.

Разработан алгоритм вейвлет-преобразования в частотной области на основе непрерывного (интегрального) вейвлет-преобразования [6]. Непрерывное вейвлет-преобразование одномерного сигнала  $S(t)$  – это его представление в виде интеграла Фурье по системе базисных функций  $\psi(t)$ :

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (1)$$

Подобно обратному преобразованию Фурье, существует обратное непрерывное вейвлет-преобразование:

$$S(t) = C_{\psi}^{-1} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) W(a, b) \frac{dad b}{a^{3+k}}, \quad (2)$$

где  $C_{\psi}$  – нормализующий коэффициент:

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} |F_{\psi}(\omega)|^2 \omega^{-1} d\omega < \infty.$$

Здесь:  $F_{\psi}(\omega)$  – Фурье-спектр базисной функции;  $\omega$  – циклическая частота, параметр  $k$  – показатель степени масштабного множителя.

Вычисление вейвлет-преобразования прямым и обратным численным интегрированием для больших временных последовательностей по формулам (1), (2) занимает количество операций пропорционально  $O(N^2)$ . Для увеличения быстродействия разработан алгоритм непрерывного быстрого вейвлет-преобразования в частотной области с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ), занимающий объем вычислений  $O(N \log_2 N)$ .

Алгоритм численного вычисления прямого непрерывного быстрого вейвлет-преобразования сигнала  $S(t)$  по формуле (1) в частотной области с использованием вейвлетов на основе производных функции Гаусса включает следующие шаги [7, 8].

1. Вычисляются коэффициенты тригонометрического ряда  $a_1(n)$  и  $b_1(n)$  сигнала  $S(k)$  с использованием БПФ:

$$a_1(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S(k) \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right); \quad (3)$$

$$b_1(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} S(k) \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right). \quad (4)$$

2. Вычисляются коэффициенты тригонометрического ряда  $a_2(n)$  и  $b_2(n)$  вейвлета  $\psi(k)$  с использованием БПФ:

$$a_2(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \psi(k) \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right); \quad (5)$$

$$b_2(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \psi(k) \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right). \quad (6)$$

3. Вычисляется комплексно сопряженный спектр:

$$c_1(n) = a_1(n)a_2(n) + b_1(n)b_2(n); \quad (7)$$

$$c_2(n) = b_1(n)a_2(n) - a_1(n)b_2(n). \quad (8)$$

Большинство непрерывных вейвлетов – либо четные, либо нечетные функции. Для четных вейвлетов ряд составлен только из косинусов, а для нечетных – из синусов, соответственно,  $b_2(n) = 0$ ,  $a_2(n) = 0$ .

Вейвлет-спектр  $W(a, b)$  (матрица вейвлет-коэффициентов  $M \times N$ ) для входного анализируемого сигнала длиной  $N$  отсчетов получается вычислением  $M$  обратных преобразований Фурье от комплексно сопряженного спектра по формуле

$$W(a, b) = \sum_{k=0}^{N-1} (c_1(k) + ic_2(k)) \exp\left(i \frac{2\pi nk}{N}\right).$$

Если прямое вейвлет-преобразование непрерывное, то вейвлеты неортогональны друг к другу, так как их Фурье-спектры перекрываются из-за незначительных отличий масштабных коэффициентов, и при реконструкции сигнал искажается. Для сохранения наибольшей точности при реконструкции сигнала масштабные коэффициенты при прямом вейвлет-преобразовании необходимо подбирать, исключая перекрытие Фурье-спектров. Предложенный алгоритм позволяет увеличить скорость непрерывного вейвлет-преобразования на четыре порядка при решении задач декомпозиции [8]. Алгоритм численного вычисления обратного непрерывного вейвлет-преобразования по формуле в частотной области с использованием вейвлетов на основе производных функции Гаусса включает следующие шаги.

1. Вычисляются коэффициенты тригонометрического ряда  $d_1(n)$  вейвлет-спектра  $W(a, b)$  с использованием прямого БПФ:

$$d_1(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} W(a, k) \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right). \quad (9)$$

2. Вычисляются коэффициенты тригонометрического ряда  $e_1(n)$  вейвлет-спектра  $W(a, b)$  с использованием прямого БПФ:

$$e_1(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} W(a, k) \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right). \quad (10)$$

3. Вычисляются коэффициенты тригонометрического ряда  $d_2(n)$  вейвлета  $\psi(t)$  с использованием прямого БПФ:

$$d_2(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \psi(k) \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right). \quad (11)$$

4. Вычисляются коэффициенты тригонометрического ряда  $e_2(n)$  вейвлета  $\psi(t)$  с использованием прямого БПФ:

$$e_2(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \psi(k) \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right). \quad (12)$$

5. Вычисляется комплексно сопряженный спектр по формулам

$$f_1(n) = d_1(n)d_2(n) + e_1(n)e_2(n); \quad (13)$$

$$f_2(n) = e_1(n)d_2(n) - d_1(n)e_2(n). \quad (14)$$

Для четных вейвлетов ряд составлен только из косинусов, а для нечетных – из синусов, соответственно,  $e_2(n) = 0$ ,  $d_2(n) = 0$ .



6. Обратным  $M+1$  преобразованием Фурье ( $M$  – количество уровней разложения) от комплексно сопряженного спектра (13), (14) вычисляется функция  $s'_m(t)$ :

$$s'_m(n) = \sum_{k=0}^{N-1} (f_1(k) + if_2(k)) \exp\left(i \frac{2\pi nk}{N}\right). \quad (15)$$

7. Из аналога теоремы Парсеваля для вейвлет-коэффициентов вычисляется нормализующий коэффициент  $C$ :

$$\int S(t)S^*(t)dt = C^{-1} \iint W^*(a,b) \frac{dad b}{a^2}.$$

8. Реконструкция сигнала согласно формуле

$$S(n) = C \sum_{m=0}^m s'_m(n),$$

где  $m$  – уровень декомпозиции.

Такой алгоритм позволяет увеличить скорость непрерывного вейвлет-преобразования на четыре порядка при решении задач реконструкции. Так как масштабные коэффициенты при реконструкции меняются, как и при декомпозиции, не на произвольно малую величину, то можно утверждать, что это не непрерывное, а ортогональное вейвлет-преобразование. Конструирование вейвлетов с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой позволило уменьшить объем вычисления до  $O(N)$ , тем самым скорость реконструкции сигналов уменьшилась на семь порядков по сравнению с прямым численным интегрированием. Алгоритм конструирования вейвлета с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой приведен в работе [9].

При использовании вейвлетов с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой реконструкция сигналов происходит точнее, чем при использовании алгоритма Малла.

Для наглядной демонстрации точности сравним результат декомпозиции и реконструкции изображения размером  $512 \times 512$  пикселей. Рассмотрим два случая – с плавным изменением интенсивности пикселей при переходе от одного участка изображения к другому и с резким переходом интенсивности пикселей. В случае резкого перехода интенсивности точное восстановление изображения является сложной задачей, так как Фурье-спектр разверток по горизонтали и вертикали медленно спадает на высоких частотах, а у изображения с плавно изменяющейся интенсивностью пикселей спектр является более узким, поэтому такие изображения реконструируются точнее.

На рис. 1, *a* продемонстрировано оригинальное изображение с резко меняющейся интенсивностью, на рис. 1, *б* – восстановленное изображение после декомпозиции на 9 уровней и последующей реконструкцией изображения на основе алгоритма Малла с использованием вейвлета Добеши db1. На рис. 1, *в* представлено изображение, полученное в результате вычисления модуля разности интенсивности пикселей оригинала и восстановленного изображения.

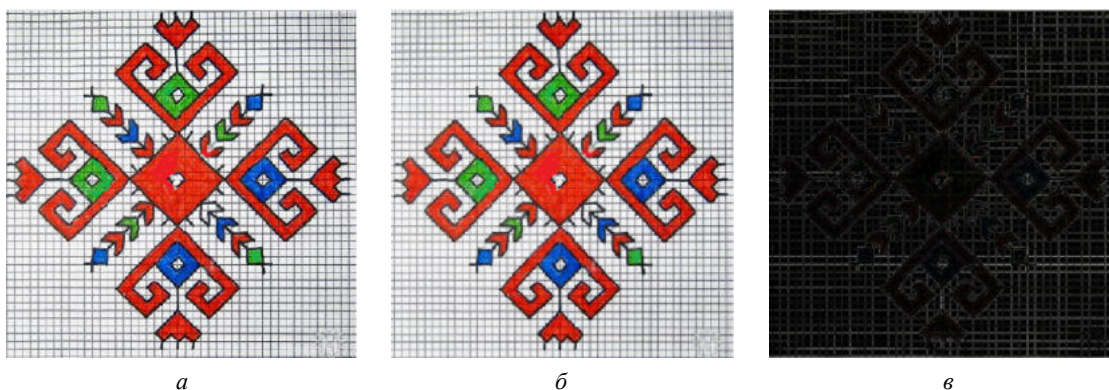


Рис. 1

На рис. 2 представлены результаты преобразования с использованием вейвлета Добеши db20.

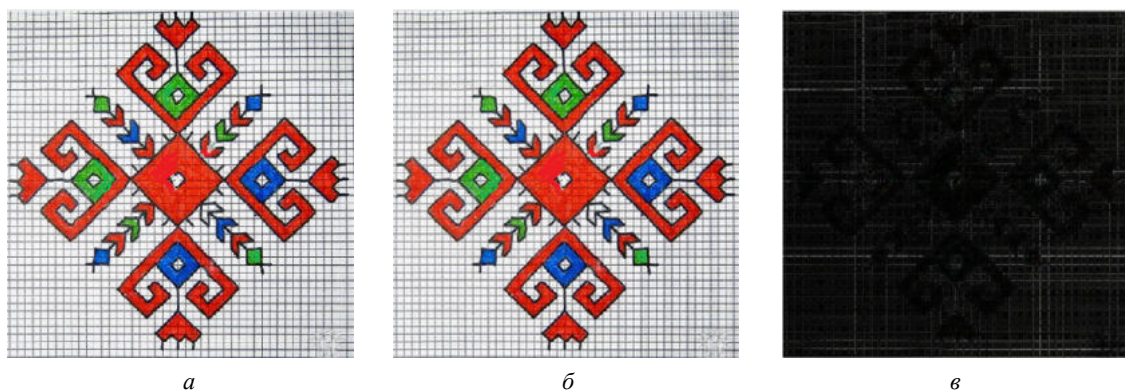


Рис. 2

На рис 1, 2, а, б визуально трудно заметить отличие между оригиналом и реконструированным изображением. Только на рис. 1, 2, в четко видна разница между этими изображениями. Такая картина получается в случае, когда модуль разницы интенсивности не менее 10–20 % от максимальной яркости изображения. С увеличением порядка вейвлета Добеши эта разница уменьшается с остаточной разницей не более 10 %. Это позволяет увидеть очертания оригинального рисунка (см. рис. 2, в).

Проведена оценка среднеквадратического отклонения восстановленного изображения от оригинала по каждому каналу RGB-пространства (табл. 1) для вейвлетов Добеши db1 и db20.

Таблица 1

Цвет	Вейвлет db1	Вейвлет db20
R канал	27,58	21,28
G канал	27,25	21,14
B канал	26,61	20,65

Также было декомпозировано и реконструировано такое же изображение (см. рис. 1, а) с использованием алгоритма в частотной области. В качестве вейвлета использовался ортогональный вейвлет с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой [10, 11]. Ввиду малости модуля попиксельной разницы интенсивности между оригиналом и восстановленным изображением визуально наблюдается черный квадрат. Модуль разницы интенсивности менее 1 % от максимальной разницы изображения. Даже для самых сложных изображений модуль разницы меньше или равен двум из 256 возможных значений интенсивности. Эксперименты показывают, что глаз способен улавливать изменение интенсивности пикселя только при разнице значений более 8-10.

В табл. 2 приведены значения среднеквадратического отклонения для вейвлета с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой.

Таблица 2

Цвет	Вейвлет с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой
R-канал	0,2389
G-канал	0,2378
B-канал	0,2308

Аналогичные операции декомпозиции и реконструкции были произведены для изображений цветов (рис. 3) и девушки (рис. 4).

Изображения попиксельной разницы между оригиналом и восстановленным изображением визуально просматриваются хуже.

Приведем результаты вычисления среднеквадратического отклонения для вейвлетов Добеши db1 и db40 и вейвлетов с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой изображения цветов и девушки (табл. 3).



Рис. 3

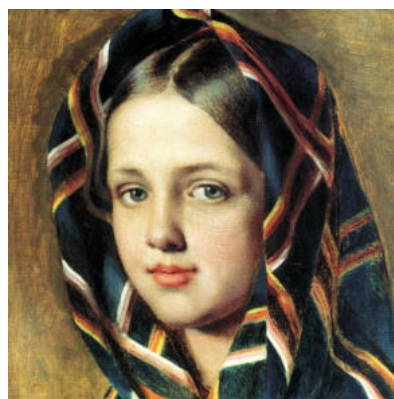


Рис. 4

Таблица 3

Цвет	Вейвлет db1	Вейвлет db40	Вейвлет с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой
	Изображение цветов		
R-канал	9,49	4,04	0,0058
G-канал	9,57	4.04	0,0229
B-канал	9,53	4,03	0,0237
	Изображение девушки		
R-канал	8,70	5,53	0,0090
G-канал	8,29	5,55	0,0074
B-канал	7.44	5.46	0.0157

При сравнении значений среднеквадратического отклонения восстановленного изображения от оригинала по каждому каналу RGB-пространства выявлено, что величина среднеквадратического отклонения для алгоритма Малла больше, чем для алгоритма в частотной области, в 80–800 раз в зависимости от резкости изменения интенсивности пикселей при переходе от одного участка изображения к другому.

Точность реконструкции наибольшая для вейвлетов с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой из-за того, что для набора вейвлетов амплитудно-частотная характеристика будет равномерной во всей полосе частот изображения, как представлено на рис. 5.

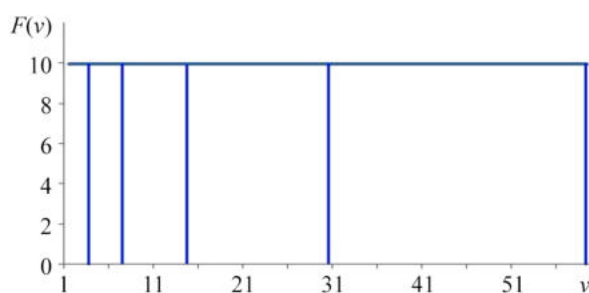


Рис. 5

Представим функцию масштабирования Добеши 20 и вейвлет (рис. 6, а) и их частотные составляющие (рис. 6, б).

Как видим (см. рис. 6), спектры вейвлетов не прямоугольные. Вейвлеты с непрямоугольной амплитудно-частотной характеристикой образуют в наборе (сумме) неравномерную амплитудно-частотную характеристику. Исследования показывают, что точность реконструкции зависит еще от способа развертки изображения. При прогрессивной развертке точность реконструкции выше, чем при обработке изображения по строкам и столбцам. В этом случае изображение обрабатывается в целом и уровней разложения будет в два раза больше.

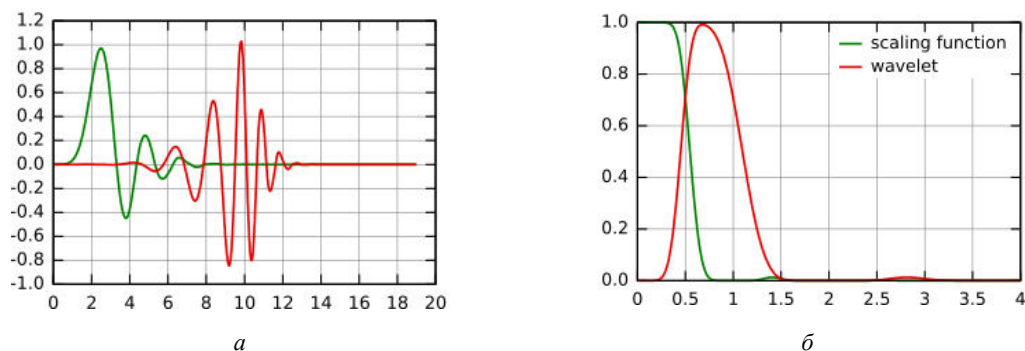


Рис. 6

На рис. 1 и рис. 2 представлено изображение попиксельной разности между оригиналом и восстановленным изображением для прогрессивной развертки, при котором изображение декомпозируется на 18 уровней, так как для изображения размером  $512 \times 512$  пикселей общее количество пикселей – 262144, что соответствует  $2^{18}$ . Для разработанного алгоритма в частотной области количество уровней может быть значительно больше, чем для алгоритма Малла, так как коэффициент изменения масштаба может быть меньше двух. В частности, при разложении изображения на 36 уровней (примерно  $1,414213562^{36}$ ) для вейвлетов на основе производных функции Гаусса среднееквадратическое отклонение меньше в два раза, чем для алгоритма Малла.

При применении вейвлетов с прямоугольной амплитудно-частотной характеристикой для изображений с резкой границей переходов интенсивности уменьшилось среднееквадратическое отклонение реконструированного изображения от оригинала в 80 раз, в сравнении с алгоритмом Малла. Это связано с тем, что при декомпозиции и реконструкции спектральный состав изображения на переходной полосе амплитудно-частотной характеристики не искажается, в отличие от вейвлетов Добеши. Разработанные алгоритмы по быстродействию превосходят алгоритм Малла в 2–8 раз в зависимости от номера вейвлета Добеши. Алгоритм вейвлет-преобразования в частотной области позволяет не только увеличить точность и быстродействие, а также исследовать изображение с изменяющимся масштабным коэффициентом равной степени, основание которой меньше двух, как прогрессивной разверткой, так и разверткой по столбцам и строкам. Это увеличивает добротность вейвлета, что позволяет выделить сигналы с большей разрешающей способностью. Для алгоритма Малла количество уровней разложения ограничено, так как коэффициент изменения масштаба составляет  $2^n$  ( $n$  – целое число). Если использовать разработанное ускоренное дискретное преобразование Фурье, то, в отличие от БПФ, можно разложить не только изображения с числом пикселей  $2^n$ , но и изображения с числом пикселей, которые делятся на четыре, например  $80 \times 80$ . С увеличением точности реконструкции изображений повышается качество обработки спутниковых снимков по топологическим признакам. В медицине такую технологию можно применить для обработки изображений компьютерной томографии, в радиотехнике – для подавления шумов и повышения разрешения радиоизображений в системах пассивного радиовидения и т. д.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ляшева С.А., Медведев М.В., Шлеймович М.П. Вейвлет-сжатие изображений в системах управления беспилотных летательных аппаратов // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2013. № 4. С. 218–222.
2. Ďuriš Viliam et al. Application of Discrete and Fast Fourier Transforms to Increase the Speed of Multiscale Image Analysis // TEM Journal. 2024. Vol. 13. Iss. 1. P. 349–354.
3. Ďuriš V., Semenov V. I., Chumarov S.G. Application of Continuous Fast Wavelet Transform for Signal Processing. London: Science Publishing, 2021. 181 p.
4. Mallat S. A Theory for Multiresolutional Signal Decomposition: The Wavelet Representation // IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1989. № 7. P. 674–693.
5. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2001, 464 с.
6. Ďuriš V., Chumarov S.G., Semenov V.I. Increasing the Speed of Multiscale Signal Analysis in the Frequency Domain // Electronics. 2023. Vol. 12. Article № 745.



7. Семенов В.И., Чумаров С.Г. От конструирования вейвлетов на основе производных функции Гаусса к синтезу фильтров с конечной импульсной характеристикой // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. № 2. С. 306–313.
8. Чумаров С.Г. и др. Способы увеличения скорости непрерывного вейвлет-преобразования при решении задач декомпозиции и реконструкции сигналов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2021. № 4 (52). С. 42–51.
9. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. Уменьшение времени обратного вейвлет-преобразования изображения с применением симметричного ортогонального вейвлета / В.И. Семенов. № 2021660692; заявл. 07.07.2021; опубл. 13.07.2021.
10. Viliam Ďuriš, Semenov V.I., Chumarov S.G. Wavelets and Digital Filters Designed and Synthesized in the Time and Frequency Domains // Mathematical Biosciences and Engineering. 2022. Vol. 19. Iss. 3.
11. Семенов В.И. Сравнение алгоритма кратномасштабного анализа изображений в частотной области с алгоритмом Малла // Вестник ТГУ. Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 59. С. 73–82.

Поступила в редколлегию 14.02.25

## IMPROVING THE ACCURACY OF IMAGE RECONSTRUCTION USING THE WAVELET TRANSFORM IN THE FREQUENCY DOMAIN

S.G. Chumarov, V.I. Semenov, and D.D. Sas

The results of a study of the accuracy of image reconstruction using the well-known Mallat algorithm and the frequency domain wavelet transform algorithm developed by the authors using the fast Fourier transform are presented. Algorithms for forward and inverse wavelet transformations in the frequency domain using wavelets based on derivatives of the Gaussian function allow decomposing and reconstructing an image using both row and column scanning and progressive horizontal and vertical scanning. For more accurate decomposition and reconstruction of images, the authors designed wavelets with a rectangular amplitude-frequency response, which further increased the calculation speed of the forward and reverse wavelet transform. Wavelets with a rectangular amplitude-frequency response have all the characteristics: orthogonality, smoothness, compactness, and symmetry or antisymmetry, and therefore they allow for the most accurate image reconstruction compared to Daubechies wavelets.

**Keywords:** wavelet transform, Fourier transform, frequency response, algorithm, decomposition, reconstruction.

---

**Чумаров Сергей Геннадьевич** – канд. техн. наук (ЧГУ, Чебоксары)

E-mail: chumarov@chuvsu.ru

**Семенов Владимир Ильич** – канд. техн. наук (ЧГУ, Чебоксары)

E-mail: syundyukovo@yandex.ru

**Сас Денис Дмитриевич** – студент (ЧГУ, Чебоксары)

E-mail: denchik.sas@gmail.com

---

## **ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ МАТЕРИАЛОВ, ПРЕДСТАВЛЯЕМЫХ К ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛ «ВЕСТНИК КАЗАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ИМ. А.Н. ТУПОЛЕВА»**

В журнале «Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева» публикуются результаты фундаментальных и прикладных исследований ученых КНИТУ-КАИ, других вузов и научных организаций. Кроме того, в журнале публикуются статьи информационного и дискуссионного характера.

Представленная в журнал работа должна быть законченным научным исследованием и содержать новые научные результаты.

Отправляя рукопись в журнал, автор гарантирует, что соответствующий материал (в оригинале или в переводе на другие языки или с других языков) ранее нигде не публиковался и не находится на рассмотрении для публикации в других изданиях.

Статья не должна превышать по объему 8 – 9 страниц с учетом рисунков и таблиц. Обзоры направляются в редакционную коллегию по предварительному согласованию.

В статьях должна быть использована международная система единиц измерения СИ.

Авторы должны избегать повторения одних и тех же данных в тексте, таблицах, графиках; сокращения допускаются только общепринятые.

Цитируемая литература нумеруется в порядке упоминания, в тексте порядковый номер ссылки заключается в квадратные скобки.

Нумерация и включение в список литературы всех упомянутых в статье источников обязательны. Ссылки на статьи, находящиеся в печати, не допускаются.

Статья, нуждающаяся в доработке, направляется авторам с замечаниями. Доработанная статья рецензируется повторно.

Материалы, представляемые к публикации, направляются в редакционную коллегию журнала по адресу 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д.10, КНИТУ-КАИ, ответственному секретарю журнала.

Материалы должны содержать:

- два экземпляра статьи на бумаге формата А4, подписанные всеми авторами, и ее компьютерный вариант;
- лист с расшифровкой индексов, образованных от русских слов;
- сопроводительное письмо на имя главного редактора;
- экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати;
- выписку из протокола заседания кафедры (отдела) или НТС организации с рекомендацией к опубликованию и указанием раздела журнала;
- сведения об авторах: фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, должность, полное название учреждения с указанием факультета и кафедры (отдела, сектора и т.п.); e-mail; телефон для связи;
- название статьи на английском языке;
- аннотацию и ключевые слова на русском и английском языках.

### **Обязательные структурные элементы статьи и их оформление**

1. УДК: размер шрифта – 10 пт, светлый курсив, выравнивание по левому краю, интервал перед абзацем и после абзаца 0 пт.

2. Название статьи: размер шрифта – 14 пт, жирный прямой прописной, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 12 пт, после – 0 пт, межстрочный интервал одинарный.

3. Инициалы и фамилии авторов: размер шрифта – 12 пт, жирный прямой, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 8 пт, после – 12 пт;

4. Аннотация на русском языке: размер шрифта – 10 пт, светлый прямой, выравнивание по ширине, перед абзацем – 0 пт, после – 4 пт, отступ слева – 2 см, отступ справа – 2 см, межстрочный интервал – множитель 1,1.

5. Ключевые слова на русском языке: размер шрифта – 10 пт, жирный прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 6 пт, межстрочный интервал – множитель 1,1.

6. Текст статьи основной: размер шрифта – 11 пт, светлый прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 0 пт, межстрочный интервал – множитель 1,1, первая строка – отступ 0,6 см; подзаголовок: размер шрифта – 12 пт, жирный прямой, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 6 пт, после – 3 пт, межстрочный интервал – множитель 1,1.

7. Список литературы заголовков: размер шрифта – 11 пт, светлый прямой прописной, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 9 пт, после – 6 пт; текст списка: размер шрифта – 10 пт, светлый прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 0 пт, отступ слева – 1 см, отступ справа – 1 см, первая строка – выступ 0,35 см, межстрочный интервал одинарный, фамилии авторов выполняются курсивом.

8. Дата отправки статьи в редакцию: размер шрифта – 10 пт, светлый прямой, выравнивание по правому краю, интервал перед абзацем – 6 пт, после – 0 пт.

9. Название статьи на английском языке: размер шрифта – 14 пт, жирный прямой прописной, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 12 пт, после – 0 пт, межстрочный интервал одинарный.

10. Инициалы и фамилии авторов по-английски: размер шрифта – 12 пт, жирный прямой, выравнивание по центру, интервал перед абзацем – 8 пт, после – 12 пт.

11. Аннотация на английском языке: размер шрифта – 10 пт, светлый прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 4 пт, отступ слева – 2 см, отступ справа – 2 см, межстрочный интервал – множитель 1,1.

12. Ключевые слова на английском языке: размер шрифта – 10 пт, жирный прямой, выравнивание по ширине, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 6 пт, межстрочный интервал – множитель 1,1.

13. Сведения об авторах (Ф.И.О., звание, должность, структурное подразделение, организация, e-mail): размер шрифта – 11 пт, светлый прямой, выравнивание по левому краю, интервал перед абзацем – 0 пт, после – 5 пт.

### **Требования к оформлению статей**

Компьютерный вариант статьи оформляется в виде единого файла, включающего полный текст статьи, формулы, таблицы, рисунки, список литературы и сведения об авторах. Файл именуется по фамилии первого автора.

Файл должен быть представлен в редакторе Microsoft Word.

#### **Параметры страницы:**

- размер бумаги – А4;
- поля – зеркальные;
- верхнее поле – 1,8 см;
- нижнее поле – 2,9 см;
- внутреннее поле – 1,4;
- наружное поле – по 2,0 см;
- расстояние до верхнего колонтитула – 0 см;
- расстояние до нижнего колонтитула – 2,2 см.

Шрифт текста статьи – Times New Roman.

**Таблицы и иллюстрации.** На все помещаемые в статью таблицы и иллюстрации (чертежи, графики, схемы, компьютерные распечатки, диаграммы, фотоснимки, рисунки) в тексте должны присутствовать ссылки. Каждая иллюстрация и таблица должна иметь содержательное наименование и номер. Следует использовать сквозную нумерацию (арабскими цифрами) в пределах статьи отдельно для иллюстраций и таблиц. Таблицы и иллюстрации располагаются непосредственно после абзаца, в котором содержится ссылка на них.

*Таблицы* представляются по следующей форме.

Слово «Таблица»: размер шрифта – 9 пт, светлый, курсив, выравнивается по правому краю таблицы.

Название таблицы: размер шрифта – 9 пт, полужирный, располагать по центру. Содержимое ячеек следует располагать по центру.

Содержательная часть таблицы: размер шрифта – 9 пт, светлый, прямой.

Толщина линий в таблицах – 0,5 пт.

Пропуски в столбцах при отсутствии данных заполняют тире.

Размерности числовых данных в таблицах выносят в текст головки или название таблицы.

*Иллюстрации* должны быть тщательно подготовлены для печати в электронном виде (сканированы или выполнены в графическом редакторе) и вставлены в текст. Сканирование должно быть выполнено с разрешением не менее 300 dpi с расширением .tif или .jpg. Допускается представление иллюстраций в формате .cdr. Иллюстрации, выполненные при помощи средств рисования MS Office, не принимаются.

Графики должны иметь полную систему указателей в подрисуночных подписях или в тексте статьи. Внутрисуночные обозначения: размер символов – 9 пт, латинские символы – шрифт Times New Roman светлый курсив, символы кириллицы – шрифт Times New Roman светлый прямой, греческие символы – шрифт Symbol светлый прямой.

Оси координат и кривые должны быть изображены линиями одинаковой толщины 0,25 мм. Координатная сетка – линиями толщиной 0,18 мм. Подрисуночная подпись: размер шрифта – 9 пт, пояснение к подрисуночным подписям: размер шрифта – 8 пт.

**Формулы** набирать в редакторе формул MathType.

Латинские символы: шрифт Times New Roman светлый курсив.

Символы кириллицы – шрифт Times New Roman светлый прямой.

Греческие символы – шрифт Symbol светлый прямой.

Размер символов в формулах:

- обычный – 11 пт;
- индекс – 65 % от обычного;
- символ – 150 % от обычного.

Формулы, на которые имеются ссылки в тексте, нумеруются и располагаются по центру строки, номер формулы должен совпадать с правым краем границы текста. После каждой формулы в соответствии с контекстом должен стоять знак пунктуации (запятая, точка и т.п.).

**Статьи, не удовлетворяющие указанным правилам оформления, будут возвращены авторам без рассмотрения.**

За справками обращаться к ответственному секретарю журнала.

Тел.: 231-97-84

E-mail: at-secretary@yandex.ru

**ВЕСТНИК  
КАЗАНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА им. А.Н. ТУПОЛЕВА**

**2025, № 2 (120)**

Ответственный за выпуск *Е.М. Зиннатуллина*  
Компьютерная верстка – *А.А. Золина*

---

Подписано в печать 20.06.25. Выход в свет 25.06.25  
Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 13.  
Тираж 200. Заказ Д74. Цена 200 руб.

---

Адрес издателя, редакции, типографии: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10, КНИТУ-КАИ,  
редакция журнала «Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева».  
Тел. (843) 238-58-10; факс (843) 236-60-32; [www.kai.ru/vestnik/](http://www.kai.ru/vestnik/) E-mail: [vestnik.kstu-kai@yandex.ru](mailto:vestnik.kstu-kai@yandex.ru)  
Address: KNRTU-KAI, 10 Karl Marx Str., Kazan, 420111, Russia

Подписной индекс – 18040

---

Издательство КНИТУ-КАИ